Die frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens – Unterstützungspotential verschiedenartiger Arbeitsmittel

D I S S E R T A T I O N S S C H R I F T

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt
der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Dresden

von
Dipl.-Psych. Martina Schütze
geboren am 29. September 1975 in Regensburg

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker, Technische Universität Dresden
Prof. Dr. phil. habil. Johannes Uhlmann, Technische Universität Dresden
PD Dr. rer. nat. habil. Pierre Sachse, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Eingereicht am: 20.01.2003
Verteidigt am: 22.07.2003

Danksagung

Diese Dissertationsschrift entstand unter der wissenschaftlichen Betreuung von Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker am Institut für Allgemeine Psychologie, Biopsychologie und Methoden der Psychologie der Technischen Universität Dresden.
Ihm danke ich für die Zeit der effektiven und angenehmen Zusammenarbeit.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich Herrn Prof. Dr. phil. habil. Johannes Uhlmann, Lehrstuhl für Technisches Design der TU Dresden, für die jederzeitige Gesprächsbereitschaft und seine zahlreichen konstruktiv-kritischen Anregungen, die mir aufgrund seiner immensen praktischen Erfahrung oftmals eine neue Sicht auf die Dinge erlaubten.

Für die angenehme Arbeitsatmosphäre danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Allgemeine Psychologie, Biopsychologie und Methoden der Psychologie und des Instituts für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der TU Dresden, vor allem Frau Dr.-Ing. Frauke Jahn, Frau Dr. rer. nat. Anne Römer, Frau Annekatrin Wetzstein, Herrn Ronald Mickan und Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Steger.
Mein besonderer Dank gebührt Frau Dr. rer nat. Sabine Ulbricht, Institut für Allgemeine Psychologie, Biopsychologie und Methoden der Psychologie, für ihre zuverlässige und freundschaftliche Unterstützung bei der Datenauswertung und ihre wertvollen Hinweise zur Abfassung der Arbeit. Ihre stete Ermutigung in der Schlussphase der Arbeit hat maßgeblich zu deren Gelingen beigetragen.

Herrn Ronny Thielemann, Student des Technischen Designs, danke ich für das große Engagement und die zahlreichen Ideen und Vorschläge, mit denen er mich bei der Entwicklung der Auswertungsmethodik und der Datenauswertung unterstützt hat. Ferner möchte ich Herrn Norbert Hentsch für die interessanten Gespräche und seine Hilfsbereitschaft im Rahmen der Datenauswertung danken.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer und Frau Sabine Müller, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD der TU Dresden, möchte ich mich für die freundliche Aufnahme während des Zeitraums meiner Untersuchungen bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Goldhahn, Lehrstuhl für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik der TU Dresden, und den Herren Guido Möller und Peter Sommer von der

Firma WACOM gilt mein Dank für die kooperative Bereitstellung der Graphiktabletts und für die diesbezüglich interessanten Hinweise.

Nicht zuletzt danke ich den zahlreichen Studenten, die als Versuchpersonen an den Laboruntersuchungen teilgenommen haben, für diese, zum Gelingen der Arbeit unerlässliche Bereitschaft.

Meinem Freund Franz Gum danke ich herzlich für sein Verständnis und dafür, dass er mir die Kunst des Ausruhens ein Stück näher gebracht hat. Meinen Eltern Hartmut und Marianne Schütze bin ich für ihr immerwährendes Vertrauen und ihre Ermutigung von Herzen dankbar.

Dresden, im November 2003 Martina Schütze

Inhaltsverzeichnis

Seite

Verzeichnis der Tabellen **12**

Verzeichnis der Abbildungen **16**

1 Einleitung **18**

2 Theoretische Grundlagen **21**

2.1 Entwerfen als Problemlöseprozess 21

2.1.1 Design Problem Solving : Definition, Ablauf und die Bedeutung der frühen Phasen 21

2.1.2 Merkmale erfolgreicher Vorgehensweisen beim Entwerfen 27

2.2 Entwerfen als mentale und motorische Tätigkeit 29

2.2.1 Gedächtnisleistungen beim Design Problem Solving 29

2.2.2 Lösungsbegünstigende mentale Problemrepräsentationen 31

2.2.3 Wechselwirkungen von internalem und externalem Handeln beim Entwerfen 35

2.3 Entwerfen mit unterschiedlichen Arbeitsmitteln und deren Funktionen im Entwurfsprozess 37

2.3.1 Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift 38

2.3.2 Rechnergestütztes Entwerfen 40

2.3.3 Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett 44

3 Gesamtfragestellung **48**

4 Analyse der psychischen Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten beim Einsatz der Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsphasen aus tätigkeits-psychologischer Sicht **49**

4.1 Arbeitsgedächtnis 49

4.1.1 Okkupieren geistiger Kapazität durch die Arbeitsmittelnutzung 49

4.2 Mentale Problemrepräsentationen 52

4.2.1 Kompatibilität von mentalen Modellen und Bedienoperationen 52

4.2.2 Wechsel des Abstraktionsgrads und der Modalität der Darstellung 53

4.3 Externalisierung 54

4.3.1 Einheit von Seh- und Handlungsraum 54

4.3.2 Sensumotorische Übersetzung 55

4.3.3 Taktil-kinästhetische Bewegungssteuerung 56
4.3.4 Sensumotorik und visuelle Rückmeldung 56
4.4 Automatische Einbindung in den weiteren rechnergestützten Konstruktionsprozess 59

5 Ein Bewertungskonzept für den Einsatz der verschiedenartigen Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsphasen 61
5.1 Bewertung im Bereich der Ergebnisse 61
5.1.1 Lösungsgüte 62
5.1.2 Bearbeitungszeit 63
5.1.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 63
5.2 Bewertung im Bereich des Erlebens 65
5.2.1 Erlebte Problemschwierigkeit 65
5.2.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit 65
5.2.3 Psychische Beanspruchung 65
5.3 Bewertung im Bereich des Prozesses 66
5.3.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 67
5.3.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 67
5.3.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 67

6 Orientierende Befragungsstudie: Nutzung und Erfahrungen im Umgang mit verschiedenen Arbeitsmitteln in den frühen Entwurfsphasen 69
6.1 Ziel- und Fragestellungen 69
6.2 Stichprobe 69
6.3 Methodik 70
6.4 Ergebnisse 70
6.4.1 Verwendete Unterstützungsformen und allgemeines Vorgehen in den frühen Entwurfsphasen 70
6.4.2 Skizzen und CAD in den frühen Entwurfsphasen und deren kombinierte Nutzung 72
6.4.3 Anfertigungs- bzw. Einsatzzwecke von Skizzen und CAD 75
6.4.4 Unterstützungsfunktionen von Skizzen und CAD 76
6.4.5 Digitales Skizzieren mit automatischer CAD-Weiterverarbeitung 77
6.5 Zusammenfassende Schlussfolgerungen für die experimentelle Pilotstudie 78

7 Experimentelle Pilotstudie: Testen der Problemstellungen und der Methodik auf ihre Eignung 81
7.1 Ziel- und Fragestellungen 81
7.2 Untersuchungsdesign 81
7.3 Stichprobe 83
7.4 Untersuchte Entwurfsprobleme 84
7.4.1 Beschreibung der konstruktiven Problemstellungen 84
7.4.1.1 Entwurfsproblem „Gartengrill“ 85
7.4.1.2 Entwurfsproblem „Korkenzieher“ 86
7.4.2 Zur Anforderungsstruktur der konstruktiven Problemstellungen 86
7.5 Experimentelle Bedingungen 88
7.5.1 Bedingung (1) „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ 88
7.5.2 Bedingung (2) „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ 88
7.5.3 Bedingung (3) „Rechnergestütztes Entwerfen“ 89
7.6 Übersicht über die Homogenisierungs- und abhängigen Variablen sowie ihre Erfassung 89
7.6.1 Operationalisierung der Homogenisierungsvariablen 90
7.6.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung 90
7.6.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung 90
7.6.2 Operationalisierung der abhängigen Variablen 91
7.6.2.1 Ergebnisvariablen 91
Lösungsgüte 91
Bearbeitungszeit 94
Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 94
7.6.2.2 Variablen des Erlebens 96
Erlebte Problemschwierigkeit 96
Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit 96
Psychische Beanspruchung 96
7.6.2.3 Prozessvariablen 97
Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 97
Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 100
Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 102
7.7 Versuchsablauf 102
7.7.1 Erhebung von Personenvariablen 102

7.7.2 Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung 103
7.7.3 Nachbefragung 104
7.8 Methoden der Datenerfassung 105
7.8.1 Begründung der Erfassungsmethodik 105
7.9 Untersuchungsanordnung 107
7.10 Strategien der Datenauswertung 108
7.11 Ergebnisse der experimentellen Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“ 109
7.11.1 Homogenisierungsvariablen 109
7.11.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung 109
7.11.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung 109
7.11.2 Ergebnisvariablen 109
7.11.2.1 Lösungsgüte 109
7.11.2.2 Bearbeitungszeit 110
7.11.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 111
7.11.3 Variablen des Erlebens 111
7.11.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit 111
7.11.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit 112
7.11.3.3 Psychische Beanspruchung 113
7.11.4 Prozessvariablen 113
7.11.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 113
7.11.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 116
7.11.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 116
7.12 Ergebnisse der experimentellen Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“ 117
7.12.1 Homogenisierungsvariable „Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung“ 117
7.12.2 Ergebnisvariablen 117
7.12.2.1 Lösungsgüte 117
7.12.2.2 Bearbeitungszeit 117
7.12.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 117
7.12.3 Variablen des Erlebens 119
7.12.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit 119
7.12.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit 119
7.12.3.3 Psychische Beanspruchung 120
7.12.4 Prozessvariablen 121

7.12.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 121
7.12.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 123
7.12.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 123
7.13 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die experimentelle Hauptuntersuchung 124

8 Experimentelle Hauptuntersuchung: Unterstützungspotential der Arbeitsmittel und Replikation der Ergebnisse 130
8.1 Zielstellungen 130
8.2 Fragestellungen und Hypothesen 130
8.2.1 Bereich der Ergebnisse 130
8.2.2 Bereich des Erlebens 132
8.2.3 Bereich des Prozesses 134
8.2.4 Replikation der Ergebnisse 136
8.2.4.1 Bereich der Ergebnisse 137
8.2.4.2 Bereich des Erlebens 138
8.2.4.3 Bereich des Prozesses 139
8.3 Untersuchungsdesign 139
8.4 Stichprobe 141
8.5 Experimentelle Bedingungen 142
8.6 Ergänzungen zu den abhängigen Variablen 142
8.6.1 Ergebnisvariablen 142
8.6.1.1 Lösungsgüte 142
8.6.1.2 Bearbeitungszeit 142
8.6.1.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 143
8.6.2 Variablen des Erlebens 143
8.6.3 Prozessvariablen 143
8.6.3.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 143
8.6.3.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 143
8.6.3.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 144
8.7 Verfahren der statistischen Datenauswertung 145
8.8 Ergebnisse der experimentellen Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“ 146
8.8.1 Prüfung der Stichprobenhomogenität 146

8.8.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung 146
8.8.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung 147
8.8.2 Ergebnisse zur Fragestellung 1: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich der Ergebnisse 148
8.8.2.1 Lösungsgüte 148
8.8.2.2 Bearbeitungszeit 149
8.8.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 149
8.8.3 Ergebnisse zur Fragestellung 2: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Erlebens 151
8.8.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit 151
8.8.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit 151
8.8.3.3 Psychische Beanspruchung 152
8.8.4 Ergebnisse zur Fragestellung 3: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Prozesses 153
8.8.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 153
8.8.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 158
8.8.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 163
8.9 Interpretation der Ergebnisse: Entwurfsproblem „Gartengrill“ 165
8.9.1 Homogenisierungsvariablen 165
8.9.2 Bereich der Ergebnisse 165
8.9.3 Bereich des Erlebens 168
8.9.4 Bereich des Prozesses 171
8.10 Ergebnisse der experimentellen Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“ 177
8.10.1 Prüfung der Stichprobenhomogenität 177
8.10.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung 177
8.10.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung 177
8.10.2 Ergebnisse zur Fragestellung 4.1: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich der Ergebnisse 178
8.10.2.1 Lösungsgüte 178
8.10.2.2 Bearbeitungszeit 179
8.10.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts 179
8.10.3 Ergebnisse zur Fragestellung 4.2: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Erlebens 181
8.10.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit 181

8.10.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit 181
8.10.3.3 Psychische Beanspruchung 182
8.10.4 Ergebnisse zur Fragestellung 4.3: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Prozesses 183
8.10.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten 184
8.10.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte 188
8.10.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen 192
8.11 Interpretation der Ergebnisse: Entwurfsproblem „Korkenzieher“ 194
8.11.1 Homogenisierungsvariablen 194
8.11.2 Bereich der Ergebnisse 194
8.11.3 Bereich des Erlebens 198
8.11.4 Bereich des Prozesses 200

9 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen 207
9.1 Zusammenfassende Diskussion beider Problemstellungen 207
9.2 Aussagefähigkeit der Ergebnisse 209
9.2.1 Einschränkungen aufgrund der Problemstellungen 209
9.2.2 Einschränkungen aufgrund der Untersuchungsmethoden 210
9.3 Beitrag der Ergebnisse zur Konstruktionsausbildung 211
9.4 Beitrag der Ergebnisse zur Gestaltung von Unterstützungsmitteln 214

10 Ausblick 218

11 Literaturverzeichnis 220

Anhang
A1 Fragebogen zum Einsatz von Arbeitsmitteln in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens 238
A2 Tab.: Prozentuale Verteilung der Probanden der Hauptuntersuchung auf die verschiedenen Studienrichtungen der Fakultät Maschinenwesen 246
A3 Allgemeiner Beobachtungsbogen (Entwurfsproblem „Gartengrill“) 247
A4 Allgemeiner Beobachtungsbogen (Entwurfsproblem „Korkenzieher“) 248
A5 Likertskalen zur Erfassung der Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung 249
A6 Instruktion 1 – „Gartengrill“ 250

A7	Instruktion 2 – „Gartengrill“	251
A8	Instruktion 3 – „Gartengrill“	252
A9	Konstruktionsauftrag „Gartengrill“	253
A10	Konstruktionsauftrag „Korkenzieher“	254
A11	Skalen zur erlebten Problemschwierigkeit und zur Sicherheit hinsichtlich der Richtigkeit der Lösung	255
A12	Mündliche Nachbefragung (Leitfaden)	256
A13	„Gartengrill“ – Schema zur Bewertung der Lösungsgüte	258
A14	„Korkenzieher“ – Schema zur Bewertung der Lösungsgüte	260
A15	Schema zur Bewertung der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts von Entwurfsergebnissen	262
A16	Kodierungsschema – Entwurfsschritte	263
A17	Entwurfsproblem „Gartengrill“ – Einfaktorielle ANOVA (SPSS-Ausdrucke)	265
A18	Entwurfsproblem „Korkenzieher“ – Einfaktorielle ANOVA (SPSS-Ausdrucke)	274

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle	Benennung	Seite
1	Hypothetische Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten der drei Arbeitsmittel bei einem Einsatz in den frühen Entwurfsphasen	60
2	Unterstützungsformen in den frühen Entwurfsphasen (N = 61; Befragungsstudie)	71
3	Schwierigkeiten bei der Anforderungsklärung und der Konzeptentwicklung (N = 61; Befragungsstudie)	72
4	Darstellung relevanter Eigenschaften anhand von Skizzen und parallel zu CAD eingesetzten Skizzen; bei CAD: Beurteilung der Erkennbarkeit relevanter Eigenschaften des Lösungskonzepts anhand des CAD-Modells als „gut“ (N = 61; Befragungsstudie)	74
5	Anfertigungs- bzw. Einsatzzwecke von Skizzen, CAD und parallel zu CAD eingesetzten Skizzen (N = 61; Befragungsstudie)	76
6	Unterstützende Auswirkungen bzw. wahrgenommene Effekte beim Umgang mit Skizzen und CAD (N = 61; Befragungsstudie)	77
7	Untersuchungsplan der Pilotstudie (N = 6; Entwurfsproblem „Gartengrill“): einfaktorieller Randomisierungsplan mit drei Stufen	82
8	Untersuchungsplan der Pilotstudie (N = 6; Replikation: Entwurfsproblem „Korkenzieher“): ausbalancierter einfaktorieller Plan mit drei Stufen	83
9	Demographische Daten und qualifikationsbezogene Informationen der Probanden aus der Pilotstudie (N = 6)	84
10	Fest- und Mindestforderung(en) des Entwurfsproblems „Gartengrill“	85
11	Fest- und Mindestforderungen des Entwurfsproblems „Korkenzieher“	86
12	Anforderungsstruktur der Entwurfsprobleme „Gartengrill“ und „Korkenzieher“	87
13	Übersicht über die Homogenisierungs- und abhängigen Variablen sowie ihre Erfassung	89
14	Teiltätigkeiten während der Lösungserarbeitung und ihre Operationalisierung	98
15	Entwurfsschritte und ihre Operationalisierung	101
16	Versuchsablauf der Pilotstudie	104
17	Fähigkeit der Probanden zur räumlichen Vorstellung (N = 6; Pilotstudie:	

	Entwurfsproblem „Gartengrill“)	109
18	Lösungsgüte der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	110
19	Bearbeitungszeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	110
20	Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	111
21	Erlebte Problemschwierigkeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	112
22	Sicherheit der Probanden hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	112
23	Psychische Beanspruchung der Probanden: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	113
24	Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Probanden an der Bearbeitungszeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	114
25	Abfolgen der Teiltätigkeiten der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	115
26	Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	116
27	Lösungsgüte der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	117
28	Bearbeitungszeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	118
29	Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	119
30	Erlebte Problemschwierigkeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	119
31	Sicherheit der Probanden hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	120
32	Psychische Beanspruchung der Probanden: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	120
33	Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Probanden an der Bearbeitungszeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	121
34	Abfolgen der Teiltätigkeiten der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	122

35 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“) 123

36 Untersuchungsplan der Hauptuntersuchung (N = 66; Entwurfsproblem „Gartengrill“): einfaktorieller Randomisierungsplan mit drei Stufen 140

37 Untersuchungsplan der Replikationsuntersuchung (N = 66; Entwurfsproblem „Korkenzieher“): ausbalancierter einfaktorieller Plan mit drei Stufen 140

38 Motivation der Versuchsgruppen zur Bearbeitung der Problemstellung (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 147

39 Fähigkeit der Versuchsgruppen zur räumlichen Vorstellung (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 147

40 Lösungsgüte der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 148

41 Bearbeitungszeit der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 149

42 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 150

43 Erlebte Problemschwierigkeit der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 151

44 Sicherheit der Versuchsgruppen hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 152

45 Psychische Beanspruchung der Versuchsgruppen: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 152

46 Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Gesamtstichprobe an der Bearbeitungszeit (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 154

47 Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen an der Bearbeitungszeit (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 156

48 Anteile der während der Lösungserarbeitung gestikulierenden und sprechenden Probanden pro Versuchsgruppe (N=66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 157

49 Abfolgen der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 158

50 Extremgruppenvergleich: Lösungsgütewert, Bearbeitungszeit und Gesamtschrittanzahl der Probanden (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“) 159

51 Extremgruppenvergleich: Prozentuale Anteile der Entwurfsschritte an der Gesamtschrittanzahl (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem

	„Gartengrill“)	160
52	Lösungserzeugung: generierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	164
53	Lösungserzeugung: korrigierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	165
54	Motivation der Versuchsgruppen zur Bearbeitung der Problemstellung (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	177
55	Fähigkeit der Versuchsgruppen zur räumlichen Vorstellung (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	178
56	Lösungsgüte der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	179
57	Bearbeitungszeit der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	179
58	Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	180
59	Erlebte Problemschwierigkeit der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	181
60	Sicherheit der Versuchsgruppen hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	182
61	Psychische Beanspruchung der Versuchsgruppen: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	183
62	Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Gesamtstichprobe an der Bearbeitungszeit (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	184
63	Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen an der Bearbeitungszeit (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	186
64	Anteile der während der Lösungserarbeitung gestikulierenden und sprechenden Probanden pro Versuchsgruppe (N=66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	187
65	Abfolgen der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	188
66	Extremgruppenvergleich: Lösungsgütewert, Bearbeitungszeit und Gesamtschrittanzahl der Probanden (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	189

67	Extremgruppenvergleich: Prozentuale Anteile der Entwurfsschritte an der Gesamtschrittanzahl (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	190
68	Lösungserzeugung: generierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	193
69	Lösungserzeugung: korrigierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	194

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung	**Benennung**	**Seite**
1	Allgemeiner Problemlösezyklus (nach VDI 2221, 1993)	23
2	Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses und Kosten (Marti, 1986; Ehrlenspiel, 1995)	25
3	Hauptfenster von *AutoCAD* mit Komponenten	42
4	*Cintiq 15X* von WACOM	46
5	Ausschnitt eines Protokolls zur Erfassung der Teiltätigkeiten	99
6	Untersuchungsanordnung	108
7	Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 44: 1. Sequenz (Minute 1 bis 5) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	160
8	Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 19: 1. und 2. Sequenz (Minute 1 bis 10) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	161
9	Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 44: 8. Sequenz (Minute 36 bis 40) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	162
10	Extremgruppenvergleich:Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 19: 13. und 14. Sequenz (Minute 61 bis 70) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)	162
11	Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 55: 1. Sequenz (Minute 1 bis 5) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)	190
12	Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 10: 1. und 2. Sequenz (Minute 1 bis 10) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem„Korkenzieher“)	191

13 Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 55: 4. Sequenz (Minute 16 bis 20) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“) 191

14 Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 10: 13. Sequenz (Minute 61 bis 65) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“) 192

1 Einleitung

Entwicklungstätigkeiten beinhalten neben dem Entwerfen von Hard-, Soft- und Orgware das Konstruieren von technischen Gebilden. Das Konstruieren als anspruchsvolle, zielgerichtete Denktätigkeit im Sinne eines schöpferisch-entwerfenden Problemlösens ist seit längerem Gegenstand der interdisziplinären Forschung von Konstrukteuren und Psychologen (z. B. Thomas & Caroll, 1979; Müller, 1986a; Hegarty, 1991; Smith & Browne, 1993; Radcliffe, 1998). Bei der Untersuchung von Konstruktionsprozessen ist eine Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dazu zählen unter anderem das Fakten- und Methodenwissen des Konstrukteurs, seine individuellen Fähigkeiten wie etwa Kreativität, seine Denk- und Handlungsstile, seine aktuelle Leistungsbereitschaft und -fähigkeit, die Aufgabenstellung, die verfügbaren Informationen und Arbeitsmittel, die Arbeitsumgebung, die zur Verfügung stehende Zeit sowie der soziale und organisatorische Kontext (u. a. Günther, 1998; Dylla, 1990). Im Mittelpunkt des Forschungsinteresses stand und steht dabei das Erfassen der komplexen Denk- und Handlungsabläufe, die sowohl in Feld- als auch Laborstudien analysiert und geprüft werden (z. B. Görner, 1974; Hales, 1987; Stauffer & Ullman, 1988; Dylla, 1990; Ball, Evans & Dennis, 1994; Fricke, 1994; Visser, 1994; Sachse & Hacker, 1997; Blessing, Chakrabarti & Wallace, 1998; Purcell & Gero, 1998; Goldschmidt, 1999; Sachse, 1999, 2001).

Steigende Anforderungen an die Produktentwicklung, wie immer kürzer werdende Entwicklungszeiten und der zunehmende Kostendruck, zwingen Unternehmen dazu, nach Unterstützungsmöglichkeiten zu suchen, die den aufwendigen Entwicklungsprozess beschleunigen (Pahl & Beitz, 1997; Grote, Beyer, Birke & Tenbusch, 1999; Pache, Weißhahn, Römer, Lindemann & Hacker, 1999; Sachse & Leinert, 1999). Immer komplexere Maschinen, Anlagen oder Fahrzeuge müssen in besserer Qualität zu niedrigeren Preisen und in kürzerer Zeit häufig in vielen Varianten oder mit kundenspezifischen Anpassungen entwickelt werden. Es stellt sich unter anderem die Frage, wie externe Unterstützungsformen beschaffen sein müssen und wann sie eingesetzt werden sollten, damit bei höchsten Qualitätsansprüchen eine Verkürzung der Entwicklungszeiten und eine Verringerung der Herstellungskosten gewährleistet werden können (u. a. Steger & Geiger, 1994; Grote, 1995; Wijers, 1997; Gebhardt, 2000; Miller, 2000; Hacker & Lindemann, 2000) .

Als ausschlaggebend für den Produktentwicklungsprozess haben sich die frühen Phasen der Aufgabenklärung und Konzeptentwicklung erwiesen, da sie eine hohe Verantwortung für alle weiteren, im Zusammenhang mit dem Produkt stehenden Kosten sowie für dessen Qualität tragen. Da hier gleichzeitig die Korrekturmöglichkeiten am größten sind, kommt dem konstruktionsbegleitenden Einsatz von aufwandsarmen, gegenständlichen Skizzen und Modellen eine

entscheidende Rolle zu (Ehrlenspiel, Bernard & Günther, 1995; Lindemann, Bernard & Irlinger, 1996; Bernard, 1997). Deren Nutzung benötigt wenig geistige Kapazität und der Zeit- und Kostenaufwand für ihre Herstellung ist gering.

Gerade der rasante Wandel von den klassischen hin zu digitalen Arbeitsmitteln im Bereich der Konstruktion erfordert es, den natürlichen Entwurfsprozess unter Berücksichtigung der begrenzten kognitiven Kapazität des Konstrukteurs detailliert zu erfassen, Skizzen und einfache Modelle als intuitiv einsetzbare Hilfsmittel zu berücksichtigen und aus den Kenntnissen zu deren Funktion und spezifischer Wirkungsweise Gestaltungsanforderungen an moderne, komplexe rechnergestützte Hilfsmittel abzuleiten. CAD-Systeme stellen durch ihre Funktionalitäten heutzutage ein wesentliches Arbeitsmittel für den Konstrukteur dar. Der Konstruktionsprozess wird jedoch offenbar durch derzeitige CAD-Systeme nicht ausreichend durchgängig unterstützt, da diese für die außerordentlich komplexen frühen Phasen wichtige Funktionen - etwa die gleichzeitige Eingabe und Bearbeitung von Skizzen - nur in unzureichendem Maße oder überhaupt nicht zur Verfügung stellen (Klose & Meerkamm, 1994). Die dadurch notwendigen Wechsel zwischen analogen und digitalen Arbeitsmitteln müssen bisher manuell durchgeführt werden und haben neben zeitlichen Einbußen in der Regel Fehler und Informationsverluste bei der Übertragung zur Folge.

Eine durchgängige Nutzung von CAD-Systemen, die einen raschen und reibungslosen Wechsel zwischen einer kontinuierlichen Konkretisierung der Produktidee und bei Bedarf einer erneuten Abstrahierung ermöglicht, wird beispielsweise mit dem WACOM *Cintiq 15X* angestrebt. Die Bedienung dieses Graphiktabletts orientiert sich an den Eigenschaften herkömmlicher Handskizzen. Gesicherte Ergebnisse über die Vergleichbarkeit des Unterstützungspotentials dieses neuartigen Arbeitsmittels liegen bislang noch nicht vor. Sie sind für die Gestaltung einer Schnittstelle zwischen den auf „digitalem Papier“ erzeugten Daten und der entsprechenden CAD-Variante jedoch unerlässlich.

Obwohl die Thematik des Arbeitsmittelvergleichs von unterschiedlichen Perspektiven aus und unter verschiedenen Aspekten immer wieder angeleuchtet wird, sind Untersuchungen auf diesem Gebiet Mangelware. Die vorliegende Untersuchung umfasst den Vergleich verschiedenartiger Arbeitsmittel hinsichtlich ihres Unterstützungspotentials beim Entwerfen von technischen Gebilden in den frühen Phasen. Papier und Bleistift, das obengenannte Graphiktablett sowie das 2D-CAD-System *AutoCAD* werden hinsichtlich der Bereiche der Ergebnisse, des Erlebens und des Prozesses näher betrachtet. Dazu bearbeiteten 66 im Hauptstudium Studierende des Maschinenbaus in einer experimentellen Laborstudie ein an realen Gegebenheiten orientiertes Entwurfsproblem. Das Entwerfen erfolgte entweder durch Freihandskizzieren mit Papier und

Bleistift bzw. mit Graphiktablett oder rechnergestützt. Bei weitgehend hypothesenkonformen Ergebnissen wollte man diese anhand einer Problemstellung mit vergleichbarem Schwierigkeitsgrad auf Replizierbarkeit testen. Auf der Grundlage der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sollen Schlussfolgerungen gezogen werden, wie zukünftige Arbeitsmittel beschaffen sein müssen, damit sie eine wirkungsvolle und effiziente Unterstützung der frühen Entwurfsphasen leisten können. Die Ergebnisse ermöglichen Hinweise für die kreativitätsförderliche, leicht handhabbare Auslegung von Eingabe- und Verarbeitungstechniken zukünftiger CAD-Systeme im Sinne einer geschlossenen Informationskette mit lösungsorientierter Mensch-Rechner-Interaktion. Zudem sollen Hinweise für die studentische Ausbildung abgeleitet werden.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel. Nach der Einleitung folgen im Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen, in denen das Entwerfen als Design Problem Solving behandelt, und die bereits genannten Arbeitsmittel mit ihren Funktionen diskutiert werden. Im Kapitel 3 findet sich die Darstellung der Gesamtfragestellung der Arbeit. Danach folgt im Kapitel 4 eine Analyse der hypothetischen Anforderungsgemeinsamkeiten und -unterschiede der Arbeitsmittel beim Einsatz in den frühen Phasen aus tätigkeitspsychologischer Sicht. Kapitel 5 beschreibt das der Untersuchung als Grundlage dienende Bewertungskonzept der drei Bereiche „Ergebnisse“ „Erleben“ und „Prozess“ mit den entsprechenden Variablen. Im Kapitel 6 wird die vor den experimentellen Erhebungen durchgeführte orientierende Befragungsstudie geschildert. Im Kapitel 7 ist die experimentelle Pilotstudie einschließlich der verwendeten Methodik und der Ergebnisse dargestellt. Die Darstellung der experimentellen Hauptuntersuchung zusammen mit den Fragestellungen und Hypothesen, der Methodik sowie den Ergebnissen und deren Diskussion findet sich im Kapitel 8. Dort sind auch die Ergebnisse der Replikationsuntersuchung dokumentiert. Im Kapitel 9 werden die Hauptergebnisse der Arbeit zusammenfassend diskutiert und deren Beitrag zur Konstruktionsausbildung und zur Gestaltung von Unterstützungsmitteln erörtert. Abschließend werden im Kapitel 10 mögliche Aspekte für weiterführende Untersuchungen vorgeschlagen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Entwerfen als Problemlöseprozess

2.1.1 Design Problem Solving : Definition, Ablauf und die Bedeutung der frühen Phasen

Das Konstruieren ist eine zielgerichtete Denktätigkeit, die komplexe Denk- und Handlungsvorgänge mit unterschiedlichen Bearbeitungs-, Beurteilungs- und Entscheidungsschritten beinhaltet (Dylla, 1990; Fricke, 1993, 1994; Hacker, 1994; Auer & von der Weth, 1994). Es umfasst nicht nur das Prüfen von gegebenen Sachverhalten und das Reproduzieren bekannter Lösungen, sondern erfordert das „lückenlose Vorausdenken" (Bock, 1955, 504) eines noch nicht existierenden Objekts. „Mehr noch, dieses Vorausdenken muss mindestens teilweise schöpferische Qualität haben, denn das zu entwerfende Gebilde soll nützliche neue Eigenschaften aufweisen" (Hacker, 1998b, 558).

Eine routinemäßige, erfahrungsgeleitete Anwendung bereits bekannter Operatoren im Sinne der Bewältigung einer Aufgabe ist bei der Bearbeitung von Konstruktionsaufträgen in der Regel nicht möglich. Der Bearbeiter wird nicht mit ausreichenden Informationen über die Zustände einzelner Variablen, über Relationen zwischen diesen und Möglichkeiten bzw. Implikationen ihrer Veränderung versorgt, um das endgültige Produkt zu spezifizieren (Reitman, 1964; 1965; Carroll, Thomas & Malhotra, 1980; Ballay, 1987; Klauer, 1995). Vielmehr handelt es sich beim Entwerfen um schöpferisch-entwerfendes Problemlösen, das man als „Design Problem Solving" bezeichnen kann (Thomas et al., 1979; Caroll, Thomas, Miller & Friedman, 1980; Rowe, 1987; Guindon, 1990a, b; Hegarty, 1991; Smith et al., 1993; Radcliffe, 1998; vgl. dazu Hacker, 1999), da „ein Subjekt an der Aufgabenumwelt Eigenschaften wahrgenommen hat, sie in einem Problemraum intern repräsentiert und dabei erkennt, dass dieses innere Abbild eine oder mehrere unbefriedigende Lücken enthält. Der Problemlöser erlebt eine Barriere, die sich zwischen dem ihm bekannten Istzustand und dem angestrebten Ziel befindet. Die Lücken im Problemraum können von unterschiedlicher Art sein. Es können Unklarheiten oder Wissensdefizite über den Anfangs-, die Zwischenzustände und den Endzustand bestehen. Weiterhin können Operatoren zur Zielerreichung fehlen, Suchrichtungen unbekannt sein u. v. a. mehr" (Lüer & Spada, 1990, 256; vgl. Klix, 1971; Dörner, 1987). Der Bearbeiter muss zur Bewältigung der Anforderungen in der Regel eine große Menge verschiedenen Wissens aktivieren und organisieren und durch eigene Entscheidungen Informationen bereitstellen (Dörner, 1976; Pahl, 1994; Kintsch & Ericsson, 1996; Sachse et al., 1997; Hacker, 1998b). Erfolgreiches Konstruieren erfordert neben dem Einsatz verfügbaren Wissens über Lösungsmethoden und Handlungsstrategien das Ermitteln neuartiger Vorgehensweisen zur Überwindung der Barrieren.

Bei der objektiven Beschreibung der Problemanforderung muss je nach Klarheit über das anzustrebende Ziel, die zur Verfügung stehenden Mittel und zu beachtenden Bedingungen zwischen gut und schlecht definierten und strukturierten Problemen unterschieden werden. Dörner (1976, 1987; vgl. Sydow, 1972; Frost, 1994) beschreibt in einer psychologischen Problemtaxonomie drei Arten von Barrieren, die den Weg zur gewünschten Problemlösung behindern:

- Bei der *Interpolationsbarriere* sind die Anforderungen als Ausgangs- und Zielzustand bekannt, aber der Konstrukteur muss die richtige Kombination bekannter Operatoren zur Transformation finden. Diese Art von Problem stellt sich bei einer Variantenkonstruktion, die gekennzeichnet ist durch die Variation der Größe und/oder der Anordnung von Teilen und Baugruppen innerhalb bestimmter Grenzen, wobei die Funktion und das Lösungsprinzip erhalten bleiben.
- Bei *Synthesebarrieren* sind Ausgangs- und Zielzustand ebenfalls klar definiert, allerdings können bekannte Mittel und Vorgehensweisen nur begrenzt genutzt werden. Dem Konstrukteur fehlen beispielsweise Informationen zur Zielerreichung oder diese sind nicht aus dem Langzeitgedächtnis abrufbar. Im Konstruktionsbereich handelt es sich hierbei um eine Anpassungskonstruktion, bei der die Hauptfunktionalität beibehalten, und das Lösungskonzept auf neue Teilproblemstellungen angepasst wird. Anpassungskonstruktionen umfassen mit etwa 50 % den größten Anteil der gesamten Konstruktionsarbeit (Roller, 1995).
- Die *dialektische Barriere* ist durch einen ungenau definierten Endzustand charakterisiert. So muss der Konstrukteur bei einer Entwicklungsstudie Kriterien für die Zielerreichung erst entwickeln. Werden hingegen neue Problemstellungen mit neuen Lösungsprinzipien bearbeitet, spricht man von einer Neukonstruktion. Die Bewältigung von Neukonstruktionen als Kombination von synthetischen und dialektischen Problemen ist am schwierigsten, da weder die Zielkriterien noch die notwendigen Aktivitäten zur Veränderung der Zustände bekannt sind. Dieser Konstruktionstyp tritt in der Praxis mit 10 bis 20 % eher selten auf (Roller, 1995).

Zielgerichtetes Handeln unterliegt einem stufenweisen Entscheidungsprozess. Es wird nach Hacker (1978) auf drei unterschiedlichen kognitiven Ebenen - der automatisierten, der perzeptiv-begrifflichen und der intellektuellen Ebene – reguliert (vgl. auch Rasmussen, 1986). Die Handlungsregulation weist eine hierarchisch-sequentielle Struktur auf, d. h., eine Handlung besteht aus untergeordneten Teilhandlungen und Operationen, die in einer logischen Folge durchschritten werden (Volpert, 1983; Hacker, 1988). Nach Miller, Galanter & Pribram (1973) kann die TOTE (Test-Operate-Test-Exit)-Einheit als allgemeines Modell zur Analyse von Denk-, Problemlöse- und Bearbeitungsprozessen herangezogen werden. Diese führt nach einer zyklischen Abfolge von Prüf-, Generierungs- oder Veränderungsschritten aufgrund einer Lö-

sung bzw. der Redefinition des Problems zur Beendigung des Handlungsvollzugs. Jeder dieser Einzelschritte bildet einen separaten Informationsverarbeitungsprozess (Rouse, 1983; Dörner, 1987).

Das Konstruieren mit seinen verschiedenen Teiltätigkeiten kann als ein iterativer Prozess in Form der VVR- (Vorwegnahme-Veränderungs-Rückkoppelungs-) Einheiten (Hacker, 1978) in Erweiterung des TOTE-Konzepts betrachtet werden. Es ist wegen dieser Erzeugungs- und Bewertungszyklen ein permanenter Korrekturprozess (vgl. Fricke, 1993; Smith et al., 1993; Radcliffe, 1998). Das Vorgehen beim Bearbeiten eines Entwurfsproblems lässt sich als Problemlösezyklus darstellen (VDI 2221, 1993; u. a. Beitz, 1992; Beitz, Birkhofer & Pahl, 1992):

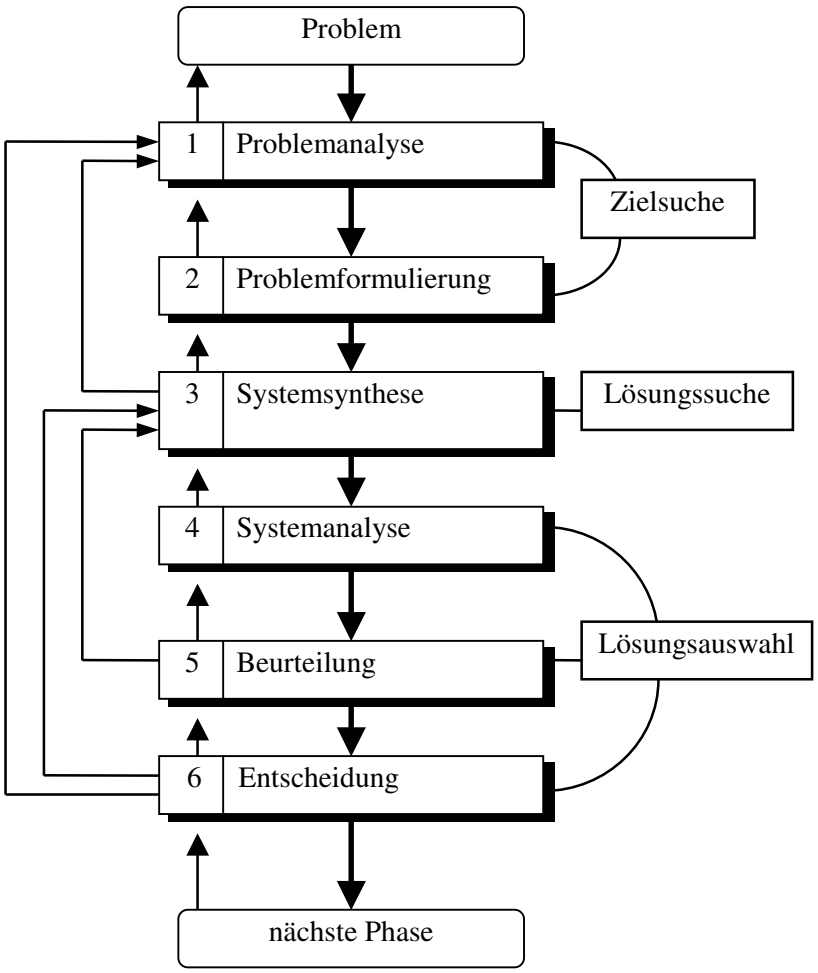


Abb. 1: Allgemeiner Problemlösezyklus (nach VDI 2221, 1993)

Bei der *Problemanalyse* steht das Erkennen der Anforderungen an das zu entwickelnde Gebilde sowie das Sammeln aller zur Bearbeitung des Problems nötigen Informationen im Vordergrund. Häufig wird das Gesamtproblem in Teilprobleme zerlegt, um eine systematische Strukturierung zu ermöglichen. Mit dem Fortschreiten der Analyse wandelt sich die ursprüngliche Sicht auf

das Problem mehrfach. Es erfolgt eine (Re-)*Formulierung* des Problems als Grundlage für die Lösungssuche. In der *Systemsynthese*, dem eigentlich kreativen Schritt des Entwurfsprozesses, sollen durch das Zusammenfügen von Teilproblemen und das Klären der globaleren Anforderungen eines Abstraktionsniveaus geeignete Lösungen gefunden werden. Diese werden zunächst nur durch ihre Beschaffenheitsmerkmale - in der Regel durch Skizzen und Zeichnungen - beschrieben. Bei der *Systemanalyse* werden die Funktions- und Relationsmerkmale der Lösungen ermittelt, und in einem weiteren Schritt die Erfüllungsgrade durch *Beurteilung* festgestellt. Auf deren Grundlage lässt sich eine *Entscheidung* über den weiteren Fortgang des Prozesses treffen. Die abgebildeten sechs Schritte des Problemlöseprozesses können vereinfachend zu den drei Abschnitten *Zielsuche, Lösungssuche* und *Lösungsauswahl* zusammengefasst werden (Ehrlenspiel, 1995; Ellis & Hunt, 1993).

In Bezug auf die erläuterten Überlegungen zum Ablauf von Konstruktionsprozessen gliedern Pahl et al. (1997) die Problembearbeitung in vier Hauptphasen (vgl. auch Breiing & Flemming, 1993):

(1) Klären der Anforderungen
(2) Konzipieren
(3) Entwerfen
(4) Ausarbeiten.

Die erste Phase beinhaltet die Produktplanung; der Bearbeiter muss Informationen über die an das Produkt gestellten Anforderungen und über bestehende Bedingungen sammeln und adäquate interne Repräsentationen aufbauen. Diese anfängliche *Anforderungsklärung* ist jedoch in aller Regel nicht vollständig, und der Bearbeiter beschäftigt sich im Verlauf des Entwurfsprozesses je nach den individuellen Voraussetzungen und erreichten Zwischenergebnissen wiederholt mit den Anforderungen (Auer et al., 1994). In der Phase des *Konzipierens* erfolgt die prinzipielle Lösungsfestlegung durch das Aufstellen von Funktionsstrukturen und das Suchen nach geeigneten Wirkprinzipien. Anschließend wird in der Phase des *Entwerfens* die Baustruktur des Produkts entsprechend technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten erarbeitet, und somit die Lösung gestalterisch festgelegt. Abgeschlossen wird der Konstruktionsprozess mit dem *Ausarbeiten* im Sinne der herstellungstechnischen Festlegung der Lösung.

Ausschlaggebenden Einfluss auf die Qualität der Lösung und die Höhe der Kosten haben dabei die wenig formalisierbaren frühen Abschnitte der Anforderungsklärung und des Konzipierens. Hier müssen in kürzester Zeit große Mengen an Informationen verarbeitet und entsprechende Entscheidungen getroffen werden. Bis zu 80 % der Produktionskosten werden bereits während des ersten Fünftels des Produktentwicklungsprozesses bestimmt, gleichzeitig sind die Korrek-

turmöglichkeiten hier noch am größten (Marti, 1986; Vajna, 1991; Ehrlenspiel, 1995; Ullman, 1997; Ulich, 1998). Das Konstruieren in den ergebnis- und kostenbestimmenden frühen Phasen kann als entwerfendes Problemlösen mit hoher Ergebnisunsicherheit, als „unaufhebbarer Kernwiderspruch zwischen anspornender Chance und beeinträchtigendem Risiko“ (Hacker, Sachse & von der Weth, 1996, 138; vgl. auch Beitz, 1984; Buur & Andreasen, 1989; Klose et al., 1994; Hacker, 1999) gesehen werden. Mit dem Fortschreiten des Konstruktionsprozesses steigen die Änderungskosten und der Bearbeitungsaufwand an, wohingegen die Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung stark absinken. Die Abbildung 2 verdeutlicht diese Zusammenhänge:

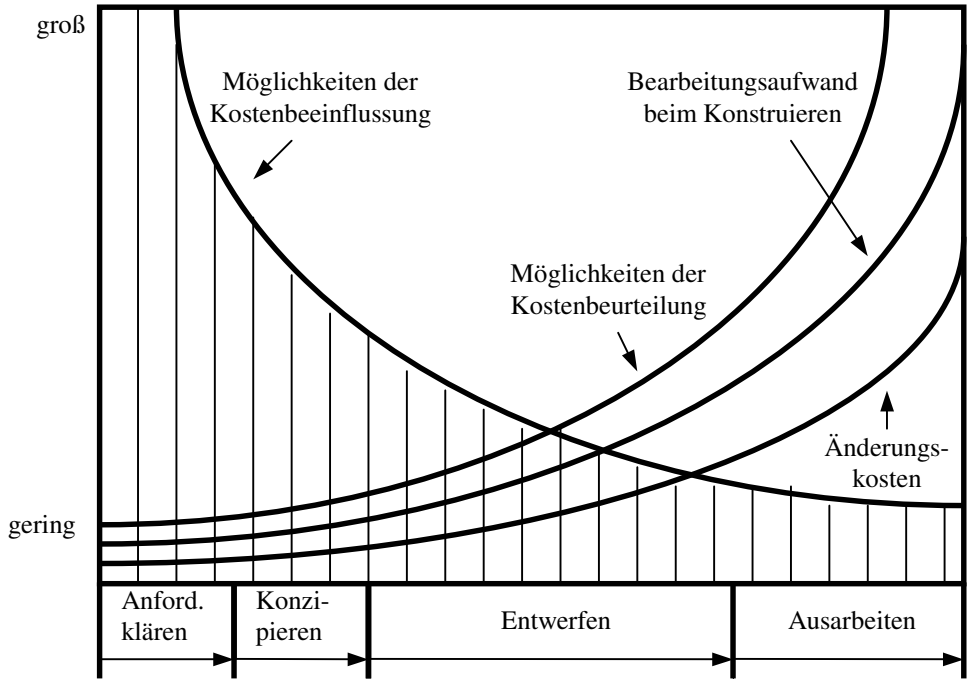


Abb. 2: Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses und Kosten (Marti, 1986; Ehrlenspiel, 1995)

Verallgemeinerte und damit auf unterschiedliche konstruktive Problemstellungen übertragbare Vorgehensweisen - wie z. B. der beschriebene Problemlösezyklus (VDI 2221, 1993) - sollten als heuristische Handlungsempfehlung zur Anleitung der Suche nach Lösungen verstanden werden und nicht als strikte, algorithmische Regeln (Hacker, Sachse & Schroda, 1998; Müller, 1990; Görner, 1994). Bei Konstruktionsprozessen existiert keine „kanonisierbare Optimalform“ (Dörner, 1994, 160). Wie in Abbildung 1 ersichtlich, bezieht der Vorgehensplan für konstruktive Entwurfsprozesse Rückkopplungsschleifen als wesentliche Bestandteile des Ablaufs mit ein. Bei der Bearbeitung von Entwurfsproblemen existiert selten ein völlig systematisches, sprungfreies Ausarbeiten von Lösungen, vielmehr überwiegt ein iteratives, opportunistisches, aber dennoch zielgerichtetes Vorgehen (Hacker, 1996b, 1999b; vgl. auch Visser, 1990; Baykan,

1996; Heinrich, 1989; Ball & Ormerod, 1995): „Der Mensch ist nicht so geschaffen, dass er ein Problem erkennt, durchdenkt und in seiner Gänze löst. Die natürliche Vorgehensweise ist so, dass der Konstrukteur sich ein Teilproblem überlegt, über mehrere Stufen oder Varianten zu einer Lösung findet, diese mit anderen Teillösungen zusammenbindet und ggf. anpasst und so über Zwischenstufen und viele Änderungen ... zur Gesamtlösung kommt“ (Buss, 1989, 32).

In der konstruktiven Praxis findet sich in der Regel eine Kombination aus der Nutzung vorhandenen Wissens und dem Neuentwickeln von Lösungsansätzen (Guindon, 1988; Logan & Smithers, 1993; Visser, 1994; Günter & Ehrlenspiel, 1998). Braczyk, Kerst & Seltz (1998) weisen darauf hin, dass Kreativität zwar die Schöpfung von etwas Neuem impliziert, dabei jedoch auf den Anschluss an Bestehendes angewiesen ist. Sie zeigt sich darin, neue Zusammenhänge im Bestehenden zu entdecken oder neue mit vorhandenen Elementen zu verbinden (vgl. auch Grabowski & Rude, 1989; Ward, Finke & Smith, 1995; Schlicksupp, 1998). Der Konstrukteur bringt zunächst assoziativ Wissen über ähnliche Problemstellungen in Erinnerung. Im Laufe des Bearbeitungsprozesses wird durch die Nutzung externer Informationen oder durch einen Wechsel der Aufgabe bzw. des Standpunkts entdecktes, für die Problemlösung relevantes Wissen auf der Grundlage des Vorhandenen interpretiert und mit ihm vernetzt (Guindon, 1990a, b; Sonnentag, 1996; Visser, 1994). Mit diesem Konzept der sich bietenden Gelegenheit erklärt Visser (1990, 1994) das Abweichen vom systematischen Zerlegungsprozess. Auf der Grundlage der flexiblen Anpassung an das zu lösende Problem erfolgt in Abhängigkeit von Situations- sowie Personenmerkmalen des Konstrukteurs eine „zielgerichtete Verknüpfung von Wissensinseln“ (Riemer, Weißhahn & Hacker, 1999, 4). Die Einzelmerkmale dieses opportunistischen Vorgehens fassen Hacker et al. (1996, 147) zusammen (vgl. auch Hacker, 1997, 1998a):

- „Es wechselt unregelmäßig zwischen mentalen und externalen Verdeutlichungsversuchen von Problemteilen.
- Es erfolgt keine vollständige und systematische Problemzerlegung bevor zum Entwerfen übergegangen wird, und das Problemverständnis ist bei den anfänglichen Übergängen zur Bearbeitung noch nicht vollständig.
- Die unregelmäßigen Wechsel der Problembereiche und der Abstraktionsebenen ihrer Bearbeitung sind bedingt durch ein erfahrungsgestütztes Entdecken von lösungsbedeutsamem Wissen.
- Das entdeckte Wissen veranlasst eine Problemreformulation und manchmal den Wechsel im Vorgehensplan.“

Das Design Problem Solving kann zusammenfassend als ein kreativer Prozess des wissensbasierten, opportunistischen Entwickelns von Lösungen mit geplanten Episoden beschrieben werden, denn es „erfordert die ingeniöse Anwendung existierender funktionaler Prinzipien und Elemente in neuen Kontexten, sowie die Kombination bereits bekannter, vorhandener Materia-

lien und Komponenten in neuen einheitlichen Strukturen, unter Berücksichtigung einer hohen Anzahl technischer Sachzwänge und ökonomischer Einschränkungen“ (Facaoaru, 1995, 12; vgl. auch Harris, 1960; Newell, Shaw & Simon, 1962; Haefele, 1962; Rossman, 1964; Offner, 1967; Andrus, 1968; Owens, 1969; Moore, 1969; Crosby, 1972; Thorn, 1979; Beitz, 1985). Beim kreativen Lösen technischer Probleme müssen anscheinend konträre kognitive Operationen und Strategien gleichzeitig und vor allem zielgerichtet angewendet werden: „divergent-transformatorische sowie konvergent-evaluative Denkfähigkeiten, synthetisch-globalhaftes sowie analytisch-reflexives Denken, intuitiv-heuristische sowie analytisch-algorithmische Lösungsstrategien“ (Facaoaru, 1995, 12; vgl. auch Roadstrum, 1967; Newell & Simon, 1972; Crosby, 1972; Davis, 1973; Meßner, 1987; Ward et al., 1995; Ward, Smith & Finke, 1999).

2.1.2 Merkmale erfolgreicher Vorgehensweisen beim Entwerfen

Unterschiedlich leistungsstarke Konstrukteure unterscheiden sich nicht signifikant hinsichtlich formaler Intelligenzmerkmale im Sinne herkömmlicher Intelligenztests (Pahl, 1994). Auch das räumliche Vorstellungsvermögen und die Berufserfahrung dienen nur als begrenzte Erklärungsmöglichkeit für die Lösungsgüte. Vielmehr belegen zahlreiche Untersuchungen (z. B. Görner, 1994; Dörner, 1988; von der Weth, 1988; Ehrlenspiel & Dylla, 1991; Fricke, 1994; Sachse & Hacker, 1995; Cross & Cross, 1998), dass sich erfolgreiche Konstrukteure durch eine zielgerichtete Planung und Steuerung ihres Vorgehens sowie eine gründliche Klärung der Ziele bei flexibler Zielanpassung an Erfordernisse und Einsichten auszeichnen. Die entscheidenden Merkmale bei der Trennung leistungsstarker von weniger leistungsstarken Konstrukteuren sind also die mentalen Arbeitsstrategien.

Merkmale erfolgreicher Strategien basieren zum einen auf Charakteristiken der Zielsetzung und -verfolgung, dem Aspekt der Antriebsregulation des Handelns, und zum anderen auf den angewendeten Prozeduren und Instrumenten zur Zielverwirklichung, dem Aspekt der Ausführungsregulation (Hacker et al., 1996; Hacker, 1997, 1999). Leistungs- und ergebnisbestimmende Voraussetzungen für ein erfolgreiches Design Problem Solving sind nach Hacker (1996b)

1) die Art des Erfassens und Analysierens des Problems,
2) die Art der Suche nach einem Lösungsprinzip und
3) die Evaluierung der Lösungsprozeduren.

(1) Hinsichtlich der Art des Erfassens und Analysierens des Problems zeichnen sich erfolgreiche Konstrukteure vor allem aus durch:

- eine eingehende Problemanalyse,
- die Konzentration auf Elemente, die für die Funktionsfindung wichtig sind,

- das vollständige Bestimmen der Hauptfunktionen,
- das gewichtete Zusammenfassen der Zielmerkmale,
- ihr schriftliches bzw. zeichnerisches Fixieren sowie
- eine zielbezogene, aber dennoch flexible Arbeitsmethode.

(2) Merkmale erfolgreichen Vorgehens bezogen auf die Art der Suche nach Prinziplösungen sind:

- das Erzeugen neuer anstelle des Modifizierens vorhandener Lösungen („generierende" statt „korrigierende" Lösungserzeugung; Ehrlenspiel, 1995),
- das Konzipieren mehrerer verschiedener Lösungsprinzipien (= divergentes, schöpferisches Denken),
- das konvergierende Eingrenzen der Lösungsvielfalt auf möglichst wenige Varianten sowie
- das Aufstellen sachlogisch geordneter Teilziele.

(3) Bei der rückkoppelnden Beurteilung der Lösungsschritte unterscheiden sich leistungsstarke Konstrukteure durch:

- das systematische Beurteilen der Lösungsvarianten im Hinblick auf die Lösungsgüte und
- das Evaluieren sowohl abstrakter Prinzipien als auch konkreter Detaillösungen (Hakker et al., 1996).

Die genannten mentalen Vorgehensstrategien beim Design Problem Solving werden in essentieller Weise durch die erforderlichen Gedächtnisleistungen sowie die Beschaffenheit der mentalen Problemrepräsentationen des Bearbeiters beeinflusst. Diese bilden die Grundlage erfolgreicher Entwurfsprozesse und bedingen das Wesen des Entwerfens als Wechselspiel zwischen internalem, geistigen und externalem, motorischen Handeln.

2.2 Entwerfen als mentale und motorische Tätigkeit

2.2.1 Gedächtnisleistungen beim Design Problem Solving

Das Gedächtnis repräsentiert nach Dörner (1994, 150) als „Zeitkanal“ das Medium aller psychischen Prozesse. Es bildet ein informationsverarbeitendes System und besteht aus einer Reihe von miteinander agierenden Instanzen mit verschiedenen Aufgaben: Das in seiner Kapazität nahezu unbegrenzte, semantisch basierte Langzeitgedächtnis beinhaltet allgemeines und abstraktes (Erfahrungs-)Wissen, auf das nur langsam und assoziativ zugegriffen werden kann. Im Gegensatz dazu speichert das Kurzzeitgedächtnis bewusste, aktuelle Informationen in symbolischer Form, ist allerdings in seiner Kapazität begrenzt. Das sog. sensorische Register oder Ultrakurzzeitgedächtnis sorgt für eine sehr kurzfristige Aufrechterhaltung der augenblicklichen Reizsituation vor der Verarbeitung. Diese Instanzen werden im Rahmen des Ein-Speicher-Modells nicht als separate Teilsysteme betrachtet (vgl. Mehr-Speicher-Modell, z. B. Atkinson & Shiffrin, 1968; Newell et al., 1972), sondern als eine Einheit, in der unterschiedliche Stufen der Informationsverarbeitung vorliegen (Shiffrin, 1975; Shiffrin & Schneider, 1977).

Auch das Konstruieren als Denktätigkeit findet in den Strukturen des Gedächtnisses statt und Gedächtnisinhalte sind in vielfältiger Weise beim Design Problem Solving beteiligt. Eine zentrale Bedeutung für den im Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Verlauf des Problemlöseprozesses besitzt das sog. Arbeitsgedächtnis. Das Arbeitsgedächtnis ist ein komplexes System, bei dem sich nach Baddeley & Hitch (1974) drei Einheiten unterscheiden lassen (auch Baddeley, 1989, 1990, 1992). Die zentrale Exekutive dient als kontrollierende, aktiv-koordinierende Verarbeitungskapazität der Steuerung aller Vorgänge im Arbeitsgedächtnis. Diese Leitzentrale verfügt über zwei Subsysteme:

1) das *System der optischen Vorstellungsbilder*, das auf der Annahme beruht, dass räumliche Informationen mittels eines abstrakten Kodes im Langzeitgedächtnis gespeichert werden und über ein räumliches Hilfssystem des Kurzzeitgedächtnisses abgerufen und verarbeitet werden können;

2) die *artikulatorische Schleife*, die sich auf den Aspekt der sprachlichen Kodierung des Kurzzeitgedächtnisses stützt (vgl. dazu auch Dörner, 1988, 1995a).

In Abgrenzung zum Kurzzeitgedächtnis, das als „passiver Pufferspeicher“ verstanden wird (Danemann & Carpenter, 1980), kommt dem Arbeitsgedächtnis eine aktive Rolle als „funktionelle Einheit des gleichzeitigen Verarbeitens und Behaltens verarbeitungsrelevanter Informationen“ (Hacker, Hübner, Müller, Nedkowa, Osterland & Wollenberger, 1992, 4; vgl. auch Baddeley, 1990, 1992; Ericsson & Kintsch, 1991; Cantor & Engle, 1993; Dörner, 1988, 1995a; Kintsch et al., 1996) zu. Während des Design Problem Solvings wird dieses Gedächtnis benötigt

• zur Speicherung erworbener Erfahrungen und erlernten Wissens, etwa über allgemeine physikalische Gesetzmäßigkeiten oder mechanische Prinzipien,

• zur Aktivhaltung unmittelbarer Anforderungen sowie

• in der Funktion einer Verarbeitungsinstanz, „die versucht, aktuelle Anforderungen mit vorliegendem Wissen in Einklang zu bringen, um angestrebte Änderungen in Richtung auf eine Lösungsfindung zu erreichen“ (Lüer et al., 1990, 261).

Die Inhalte des sich über die Zeit nur langsam verändernden Langzeitgedächtnisses werden im schnell veränderlichen Arbeitsgedächtnis als „Materiallieferant“ für die Organisation des gegenwärtigen Handelns bereitgestellt (Dörner, 1988, 1995a). Aus der Koordinationsfunktion zwischen verschiedenen Behaltens- und Verarbeitungsprozessen, die auf gleiche Ressourcen zurückgreifen, resultiert eine Trade-Off-Beziehung (Baddeley et al., 1974): Während bei hoher Speicheranforderung nur eine geringe Verarbeitungsgüte gewährleistet werden kann, können umgekehrt Informationen nur bedingt aufrechterhalten werden, wenn ihre Verarbeitung hohe Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis stellt. Diese Prozesse sind also mit der begrenzten mentalen Verarbeitungskapazität des Gedächtnisses konfrontiert, die nach Miller (1956) 7 ± 2 Wissenseinheiten (chunks) umfasst. Demzufolge wird das Arbeitsgedächtnis häufig als das „Nadelöhr kreativen Entwerfens“ (Hacker et al., 1996, 143; vgl. auch Ullman, Wood & Craig, 1990) bezeichnet. Erfordernisse, Probleme verstärkt mental zu lösen, haben in der Regel ein deutliches Absinken der Lösungsgüte zur Folge, da das Arbeitsgedächtnis hierbei stark belastet wird (Klauer, 1995). So belegen auch empirische Untersuchungen, dass interindividuelle Unterschiede beim Lösen komplexer Probleme mit der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zusammenhängen (Kyllonen & Christal, 1990). Je geringer die Arbeitsgedächtniskapazität des Bearbeiters, desto mehr überflüssige Schritte tätigt er bei insgesamt größerem Zeitbedarf (Sachse & Leinert, 1996; Hacker, 1996b). Auch besteht die Gefahr von Denkfehlern, die sich auf die Qualität der internen Repräsentation und damit entscheidend auf den Entwurfsprozess auswirken können (s. hierzu Kluwe, 1990; Reason, 1986, 1987; Norman, 1986; Ehrlenspiel, 1993).

Einer erhöhten Belastung mentaler Ressourcen wirken Problemlöser gemäß dem „Prinzip der kognitiven Ökonomie“ (Tversky & Kahnemann, 1973; Visser, 1994; Hacker, 1998a) durch deklarative und prozedurale Vereinfachung entgegen. Der Mensch als „kognitiver Geizhals“ (Taylor, 1980) ist bestrebt, eine effiziente Lösung mit möglichst geringem kognitiven Aufwand zu erreichen. Im Konstruktionsbereich findet sich dieser Fehlerfaktor z. B. in der sog. Zentralreduktion, einer zu starken Vereinfachung eines Entwurfsproblems auf wenige Einflussgrößen (Ehrlenspiel, 1995; vgl. Dörner, 1989).

Bei Überlastung und Interferenz der Prozesse des Aktivierens, Behaltens und Verarbeitens kommt es zu einem unbeabsichtigten Informationsverlust durch Ausblenden oder Übersehen.

Entwerfende passen ihre Vorgehensweise entsprechend dem „Prinzip der begrenzten bzw. mangelhaften Rationalität“ (Simon, 1990; vgl. Maier, 1933; Duncker, 1935; Luchins, 1942; Norman, 1986) den begrenzten Ressourcen an und arbeiten mit vereinfachten, nicht angemessenen subjektiven Repräsentationen und approximativen Problemlösestrategien (Klauer, 1993, 1995). Sie beschränken sich während der Lösungssuche häufig auf Bekanntes.

Ferner werden komplexe Vorgänge und Systeme beim Entwerfen nicht simultan, sondern nur sequentiell bearbeitet. Es erfolgt eine Aufgliederung in Teilprobleme und eine Zwischenzielbildung vom Vorläufigen zum Endgültigen, vom Qualitativen zum Quantitativen, vom Abstrakten zum Konkreten (Ehrlenspiel, 1995, 1999).

Auf der Grundlage dieser Befunde wird die Notwendigkeit einer Entlastung des Arbeitsgedächtnisses „als Mittler zwischen Erfahren, Erinnern und Planen“ (Baddeley, 1982, 204) im konstruktiven Entwurfsprozess nahegelegt. Dies kann beispielsweise durch das zeichnerische oder schriftliche Fixieren von Überlegungen im Sinne eines Auslagerns in einen externen Speicher geschehen (Bach, 1973; Muthig & Schönpflug, 1981; Schönpflug, 1986; Richter, 1987; Dörner, 1994; Goel, 1995; Viebahn, 1996; Purcell et al., 1998). Im Hinblick auf die Funktion der Speicherhilfe besteht kein wesentlicher Unterschied im Nutzen der Unterstützungsformen; sämtliche Veräußerlichungen zeichnen sich durch das externe Ablegen von Informationen aus und verhindern infolgedessen eine Überbelastung der mentalen Ressourcen und eine Interferenz der Verarbeitungsprozesse (Muthig et al., 1981; Schönpflug, 1986; Dörner, 1994; Sachse et al., 1995; Hacker, 1998b).

2.2.2 Lösungsbegünstigende mentale Problemrepräsentationen

Entscheidend für das Verstehen des Problemlösens ist neben der objektiven Beschreibung der Problemanforderungen die subjektive mentale Repräsentation durch den Bearbeiter. Diese subjektive Repräsentation enthält das Wissen über die Problemstellung, über die Menge verfügbarer Handlungen und das Abbild vom Problem selbst und bildet als Problemraum eine Grundvoraussetzung für intentionsgeleitetes, zielgerichtetes Handeln (Klix, 1971; Newell et al., 1972; Anderson, 1978; Gentner & Stevens, 1983; Kluwe, 1990; vgl. auch Kluwe & Haider, 1990). Hacker (1986, 1992, 37) konkretisiert mentale Repräsentationen als handlungsleitende psychische Abbilder: „relativ überdauernde stabile Wissensgefüge über einen handlungsbezogenen Realitätsbereich, die mit Bezug auf die Handlungsführung entstehen und eine Tendenz in diese einschließen.“ Als Grundlage für internale Verarbeitungsoperationen bilden sie im konstruktiven Entwurfsprozess den Suchraum für mögliche Lösungen.

Ideal wäre es, wenn der Entwerfende alle Möglichkeiten einer Lösung aus der erschöpfenden Kombination ihrer Merkmale mittels seines „inneren Auges“ (Ferguson, 1993, 3) erzeugen könnte, um daraus ein optimales Merkmalsmuster auszuwählen. Dies ist jedoch wegen der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses (s. Abschnitt 2.2.1) nicht möglich. Der Bearbeiter muss sich auf eine ausgewählte Teilmenge von Merkmalskombinationen beschränken. Dabei ist es leistungsentscheidend, ob der aufgebaute Suchraum zutreffende und lösungsgünstige Repräsentationen des Problems enthält (Hacker et al., 1996; Hacker, 1997; vgl. Brown & Chandrasekaran, 1989; Cross, Dorst & Roozenburg, 1992; Ellis et al., 1993; Visser, 1994; Sommerfeld, Krause & Schleußner, 1995; Krause, 1997). Sommerfeld, Krause & Schleußner (1995, 136) schreiben dazu: „Soll eine kognitive Anforderung auf der Grundlage einer extern gegebenen Information bewältigt werden, muss eine geeignete Repräsentation aufgebaut bzw. entsprechend modifiziert werden, die dann die Grundlage für die Anforderungsbewältigung bildet. Hiermit sind zwei Komponenten des Prozesses gekennzeichnet, der erforderlich ist, um eine kognitive Anforderung gezielt bewältigen zu können: der Prozess der Erzeugung und Transformation einer mentalen Repräsentation ... und der Prozess der Nutzung dieser mentalen Repräsentation für die Anforderungsbewältigung“ (vgl. auch Hacker et al., 1998; Klauer, 1995). Defizitäre Denkergebnisse können somit durch ungeeignete bzw. unvollständige interne Repräsentationen oder durch ineffiziente Operationen an diesen verursacht werden.

Zur Art und Weise des Aufbaus mentaler Repräsentationen existieren unterschiedliche theoretische Auffassungen, die in ihren Grundzügen im folgenden kurz dargestellt werden sollen. Mehrere Autoren stützen sich auf die Annahme, dass mentale Repräsentationen externe Gegebenheiten analog wiedergeben (Paivo, 1969, 1971, 1986; Steiner, 1988). Das bedeutet, die Repräsentation verkörpert eine „strukturerhaltende Abbildung, die dafür sorgt, dass intrinsisch die inhärenten Gesetzmäßigkeiten des Originals erhalten bleiben“ (Rehkämper, 1993, 123). Ein Beispiel für diese Annahme ist die duale Kodierungstheorie von Paivo (1971, 1986), der ein bildhaftes und ein verbales Kodierungssystem unterscheidet. Die Einheiten des bildhaften, nonverbalen Systems ermöglichen über einen parallelen Verarbeitungsmodus den Aufbau analoger visueller Vorstellungen. Das sequentiell organisierte verbale Kodierungssystem sorgt für die Verarbeitung abstrakter sprachlicher Stimuli. Beide Systeme funktionieren unabhängig voneinander, sind jedoch verbunden und ermöglichen so eine verbale Benennung oder das Ziehen begrifflich-logischer Schlussfolgerungen aus analogen Vorstellungsbildern bzw. deren Entstehen durch verbale Kodierungen.
Die propositionale Theorie Pylyshyns (1973) postuliert im Gegensatz dazu ein Repräsentationssystem, in dem visuell-bildhafte und verbal-begriffliche Informationen unabhängig von ihrer

Kodierung durch abstrakte Propositionen vertreten werden, die in semantischen Netzwerken im Gedächtnis gespeichert sind (z. B. Anderson & Bower, 1973; Anderson, 1985; Johnson-Laird, 1983).
Einige Autoren versuchen beide Ansätze im Rahmen einer integrativen Vorstellungstheorie zusammenzuführen (Kieras, 1978; Johnson-Laird, 1980, 1983; Kosslyn, 1980; Kosslyn, Brunn, Cave & Wallach, 1984; Kosslyn & Pomerantz, 1992): Kosslyn (1980) beschreibt zum einen visuelle Oberflächenrepräsentationen, die sich im visuell-räumlichen Subsystems des Arbeitsgedächtnisses befinden (vgl. dazu Baddeley, 1990). Zusätzlich existieren im Langzeitgedächtnis propositional abgebildete Tiefenrepräsentationen, die die für die Generierung einer Vorstellung nötigen Informationen speichern. Visuelles Vorstellen kann demnach als „konstruktiver Kompositionsprozess“ bezeichnet werden, der sich aus der „Interaktion langfristig gespeicherter und kurzfristig aufrechterhaltener mentaler Repräsentationen“ (Hänggi, 1989, 30, 41) ergibt.

Untersuchungen zur Wirkungsweise mentaler Repräsentationen in der Handlungsregulation zeigen, dass korrekt und komplett aufgebaute sowie multipel kodierte mentale Modelle Leistungsverbesserungen in Form eines geringeren Zeitbedarfs, einer höheren Lösungsgüte und einer niedrigeren Fehlerquote sowie das Abnehmen der erlebten Schwierigkeit beim Bearbeiter zur Folge haben (Hacker & Clauss, 1976; Matern, 1976; Hacker & Matern, 1979; Bergmann, 1994; Hacker, 1998b; Krause, Seidel, Heinrich, Sommerfeld, Gundlach, Ptucha, Schack & Goertz, 1999). Dabei bestimmt die Komplexität eines Problems seine Analyse und die Qualität der internen Repräsentation: Je höher die Belastung mentaler Ressourcen, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit einer ungeeigneten oder fehlerhaften Repräsentation (Dörner, 1976, 1989; Anderson & Jeffries, 1985; Klauer, 1993).
Die multiple Kodierung betrifft zum einen verschiedene Modalitäten, zum anderen deren unterschiedliche Abstraktionsgrade. Hacker (1995a, 2) weist darauf hin, analog-bildhafte und begrifflich-abstrakte Repräsentationsformen „nicht als einander ausschließende Repräsentationsalternativen und auch nicht als mögliche Parallelformen zu verstehen, sondern als Pole einer Dimension mit Übergängen im Sinne von Begrifflichem im Bild und Bildhaftem im Begriff, wobei trotz der wechselseitigen Durchdringung jeder Pol spezifische Möglichkeiten der Abbildung von Realität besitzt“ (vgl. auch Dörner, 1998a; Eisentraut, 1995).
Differentialpsychologisch betrachtet, kommt dem Wechsel zwischen den Modalitäten für kreative Leistungen wie dem Design Problem Solving eine bedeutende Rolle zu: „Da eine günstige Symbiose von anschaulichem und logischem Denken eine Quelle geistiger Kreativität zu sein scheint, basiert darauf die Annahme, dass ein günstiger Wechsel zwischen bildhaft-anschaulicher und begrifflicher Vorstellung auch den konstruktiven Problemlöseprozess effek-

tiviert“ (Sommerfeld et al., 1995, 30; Krause, Schack, Gibbons & Kriese, 1997; Krause et al., 1999; Klix, 1993). Das gedankliche „Springen“ vom Bildlichen ins Begriffliche fördert nach Krause (2000) den Variantenreichtum.

Obwohl eine isolierte Darstellung dem Problemlöseprozess nicht gerecht werden kann, sollen kurz die wesentlichen Unterschiede beider Repräsentationsformen aufgezeigt werden. Während visuell repräsentierte Informationen unter einer umfassenden Betrachtung des gesamten Problemraums ganzheitlich-parallel verarbeitet werden können, findet bei sprachlichen Repräsentationen eine analytisch-sequentielle Informationsverarbeitung statt, die eine Zerlegung des Sachverhalts in Teilelemente erfordert (vgl. auch Larkin & Simon, 1987). Vorstellungsbilder enthalten implizit eine Vielzahl an Informationen über die repräsentierten Objekte und zeichnen sich durch eine hohe Plastizität aus (Dörner, 1995b; Finke, 1989). Das Gesamtbild lässt sich unter verschiedenen Blickwinkeln betrachten, aus denen wiederum neue Informationen abgeleitet werden können. Aufgrund dieser Ganzheitlichkeit besteht jedoch auch die Gefahr, sich auf eine einmal erkannte Lösung zu fixieren, von der man sich in der Folge nur noch schwer lösen kann.

Die Sprache hingegen erlaubt durch die Syntax eine weitestgehend freie und flexible Rekombination ihrer disjunkten Bedeutungsträger (Dörner, 1989). An dieser Stelle sei auf die „organisierende Kraft der Sprache beim Denken“ (von Humboldt, 1988, 217; vgl. Dörner, 1998a) hingewiesen. Untersuchungsergebnisse belegen, dass die Anleitung zur Beschreibung, Erklärung und Bewertung des eigenen Verhaltens im Sinne eines selbstreflexiven, inneren Dialogs stärkere positive Effekte auf die Problemlöseleistung hat, als das unspezifische laute Verbalisieren der Gedanken. Eine Störung des Sprachverhaltens hatte diesbezüglich negative Auswirkungen (Bartl & Dörner, 1998).

Bildhaften Repräsentationen kommt im Rahmen des Design Problem Solving, bei dem Eigenschaften und Relationen eines noch nicht existierenden technischen Gebildes festgelegt werden müssen, eine stimulierende Funktion zu (Kosslyn, 1983; Kirby & Kosslyn, 1992). Sie treten während des gesamten Entwurfsprozesses als sich auseinander entwickelnde, bildhafte Assoziationen auf und spielen in dieser Form in den frühen Phasen sowohl bei der Anforderungsklärung als auch bei der Suche nach prinzipiellen Lösungen und deren Analyse eine zentrale Rolle. Zwar lassen sich durch bildhafte Assoziationen sinnvolle Lösungsmöglichkeiten finden, der Suchraum bleibt aber durch die Beschränkung auf ähnliche Prinzipien begrenzt.

Als Instrument der Informationsanreicherung tragen bildhafte Assoziationen durch Elaborierung zu einer Amplifikation bereits bestehender Lösungen bei. Untersuchungen zeigen, dass die Nutzung von Vorstellungsbildern im Entwurfsprozess über die assoziative Aneinanderreihung

hinausgeht: Visuelle Vorstellungen können in unterschiedlicher Weise transformiert werden und ermöglichen als „Material für das Probehandeln im Kopf“ (Hacker et al., 1996, 143) eine gedankliche Simulation verschiedener Lösungsideen (vgl. dazu Görner, 1976; Cooper, 1988, 1990). Aufgrund ihrer Manipulierbarkeit werden sie im Entwurfsprozess für die Analyse und Beurteilung sowohl von visuell-räumlichen Produktmerkmalen wie Gestalt, Lage und Anordnung als auch von funktionellen und kinematischen Merkmalen einer Lösung eingesetzt (Eisentraut, 1995; Hegarty, 1991; vgl. auch Larkin et al., 1987). Schon Sir Francis Galton (1907, 78) schlussfolgerte: Konstrukteure „invent their machines as they walk, and see them in height, breadth, and depth as real objects, and they can also see them in action.“ Vorstellungsbilder erleichtern den Zugriff auf relevante Informationen; sie geben dem Konstrukteur eine Rückmeldung über die Konsequenzen einer den Entwurf betreffenden Entscheidung und erhöhen dadurch sein Verständnis für das Entwurfsproblem (Chan & Finger, 1999).

Andererseits belasten Manipulationen bildlicher Vorstellungen die zentrale Exekutive (Pearson, Logie & Green, 1996). Ein weiterer Nachteil ist die Unschärfe von Vorstellungen, so dass derartige Analyse- und Beurteilungsschritte immer mit Ungenauigkeiten behaftet sind. Der „Widerstand der Realität“ als Lücken und Widersprüche tritt dem Entwerfenden erst durch externalisierte Repräsentationen in Form von Skizzen, Zeichnungen und Modellen entgegen, da hier Festlegungen präziser überblickt werden können: „Das Zeichenbrett kann dem Konstrukteur helfen, sich die Unschärfen und Unvollständigkeiten einer sich entwickelnden Maschine vor Augen zu führen“ (Dörner, 1994, 158).

2.2.3 Wechselwirkungen von internalem und externalem Handeln beim Entwerfen

Auf den Zusammenhang, dass menschliches Handeln immer geistige und bewegungsmäßige Anteile vereinigt, hat bereits Galperin (1966, 1967a, b) in seinem Interiorisations-Exteriorisationskonzept hingewiesen. Auch im Verlauf des Entwurfsprozesses finden Wechsel zwischen innerer, geistiger und äußerer, materialisierter Bearbeitung statt (z. B. Hacker, 1995b, 1999). Das Entwerfen als zielgerichtete „interaction of making and seeing, doing and discovering“ (Schön & Wiggins, 1992, 135; vgl. auch McKim, 1972; Hacker, 1997) umfasst neben internen Denk-, Beurteilungs- und Entscheidungsschritten externe Schreib-, Zeichen- und Sprechschritte (Sachse, Hacker, Leinert & Riemer, 1999). Klauer (1995) spricht von internalem, also mentalen und externalem, an einem sichtbaren Modell vollzogenen Problemlösen. Der Entwurfsprozess benötigt eine sensumotorische Stütze (Hacker & Sachse, 1995), denn das „Be-Greifen“ als haptisches Erleben stellt im Sinne Piagets (1969) nicht nur eine bloße motorische Fertigkeit dar, sondern vor allem auch eine Erkenntnishandlung, die zur Organisation einer

komplexen und flexiblen Handlungsstruktur beiträgt (vgl. auch Sachse et al., 1995). Dazu schreibt Bach (1973, 3): „Grundsätzlich: der Ingenieur muss sich mit jeder für ihn wichtigen Gestalt unmittelbar und gründlich ... befasst haben (er muss sie angefasst haben)."

Die beim Konstruieren genutzten Externalisierungen werden allgemein als abstrahierende Darstellungen eines zu entwickelnden Produkts definiert, deren Eigenschaften und Verhalten aufgrund bestehender Analogien Rückschlüsse auf das zu entwickelnde Objekt ermöglichen (Galperin, 1966; Stachowiak, 1965, 1973; Müller, Praß & Beitz, 1992; Ehrlenspiel, 1995). Entscheidend ist die Tatsache, dass das Externalisieren neben der Fixierung und Vergegenständlichung mental verfertigter Lösungsideen der Erzeugung und Weiterentwicklung von Lösungen dient. Es ermöglicht eine rückwirkende Differenzierung, Korrektur und Kontrolle und hat durch die Unterstützung des Aufbaus geeigneter mentaler Repräsentationen die Funktion einer Entlastung des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2): „Dabei dient die Skizze bzw. Zeichnung vorwiegend der Verdeutlichung der Gedanken und Vorstellungen im Prozess der Tätigkeit, wobei diese in Wechselwirkung mit dem zeichnerischen Vorgehen und der dadurch gegebenen wahrnehmungsmäßigen Vergleichsmöglichkeit des Entstandenen mit dem inneren Modell (Ziel) ständig konkretisiert, präzisiert und kontrolliert wird. Damit erweist sich die Vorstellung des Ziels als nicht vorgefertigt" (Görner, 1974, 54). Analog zu Heinrich von Kleists bereits 1805 getätigter Aussage zur allmählichen Verfertigung des Gedankens beim Reden (1987) erfolgt erst beim Skizzieren und Modellieren ein allmähliches Verfertigen des Lösungsgedankens: „Die Lösungserzeugung ist ´Denken mit der Hand` und ´Zeichnen mit dem Kopf`" (Hacker, 1996b, 114; vgl. dazu Burger, 1986). Dabei kann das Denkhandeln Logik sowie rationale, wissenschaftliche Begriffssysteme nutzen und bewusst, also mitteilbar und kontrolliert, ablaufen; häufiger folgt es jedoch nicht-logischen Prinzipien, nutzt Alltagsbegriffe und läuft vorstellungsmäßig-bildhaft und unbewusst ab (Hacker, 1996b).

Nach McKim (1972) fördern sich der konstruktive Gedankenschritt und seine zeichnerische Fixierung wechselseitig aufgrund der ständigen visuellen Vergleichsmöglichkeiten des erzielten Bildes mit der gedanklichen Vorstellung. Buur et al. (1989, 159) bezeichnen das Entwerfen als „propagation from model to model": Um Informationen über die Produkteigenschaften zu erhalten, entwickelt der Konstrukteur eine große Anzahl verschiedener Modelle, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften, des Abstraktionsgrades, der Komplexität u. s. w. unterscheiden. Die Kombination aus externalem Handeln in Form des Skizzierens und Modellierens und den dabei erstellten Skizzen und Modellen unterstützt die beiden Hauptkomponenten mentaler Problembearbeitung. Zum einen dient sie als Speicherhilfe, indem aktivierte Wissenssachverhalte und aktuelle Informationen erhalten werden (s. Abschnitt 2.2.1), zum anderen wirkt sie als Denkhilfe beim Bearbeiten dieser Daten: Sie erleichtert dem

Denkhilfe beim Bearbeiten dieser Daten: Sie erleichtert dem Konstrukteur die Generierung, Verfertigung und Prüfung neuer Ideen durch Assoziationsunterstützung und Gedankenpräzisierung und fördert durch die Erhöhung der Transparenz das Beherrschen der Problemkomplexität (z. B. Leinert, Römer & Sachse, 1999).

2.3 Entwerfen mit unterschiedlichen Arbeitsmitteln und deren Funktionen im Entwurfsprozess

„Weder die bloße Hand noch der sich selbst überlassene Verstand vermögen Nennenswertes. Durch unterstützende Werkzeuge wird die Sache erst vollendet“ (Bacon, 1962, 41).

Unter Berücksichtigung der diskutierten Unzulänglichkeiten und Grenzen des menschlichen Denkens und der damit verbundenen Notwendigkeit einer mentalen Entlastung des Konstrukteurs verkörpern externe materialisierte Formen der internalen Problembearbeitung eine wichtige Unterstützungsmöglichkeit für das Problemlösen im konstruktiven Entwurfsprozess (Bruns, 1993, 1997; Ehrlenspiel et al., 1995; Purcell et al., 1998; Kavakli, Scrivener & Ball, 1998). Im Laufe eines Konstruktionsprozesses können eine Vielzahl externer Unterstützungsformen zum Einsatz kommen, die entweder zeichnerisch-symbolhafter, gegenständlicher oder experimenteller Natur sind. Ihr Einsatz ist unter anderem abhängig von den Funktionen, der Phase im Konstruktionsprozess und den damit verbundenen Anforderungen an den Konstrukteur (Sachse et al., 1996; Sachse, Leinert, Sundin & Hacker, 1999; Weißhahn, Pache, Hacker, Lindemann & Römer, 2000).

Bei ihrem Fehlen werden in der Literatur als Risiken unter anderem die Einengung schöpferischer Freiräume, die Beeinträchtigung kreativer Potentiale (Müller, 1986b; Pahl, 1994), die Behinderung der Problemlösefähigkeit (Müller et al., 1992; Ehrlenspiel & Günther, 1995), ein erschwerter Aufbau mentaler Modelle (Pahl & Beitz, 1993), das Auftreten kognitiver Notfallreaktionen (Dörner, 1982; Müller, 1986b) sowie eine zeitaufwendigere, erschwerte Lösungsfindung (Pahl et al., 1993; Ehrlenspiel, 1995) genannt.

Für Papier und Bleistift, das Graphiktablett und CAD als im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Arbeitsmittel wurde der neutrale Begriff „Arbeitsmittel“ gewählt, da erst im Ergebnis der Untersuchung experimentell bestätigte Aussagen zu eventuellen Unterschieden in deren Unterstützungspotential gemacht werden können. Nach Hacker (1998a, b, 1997) können Arbeitsmittel Werkzeuge, klassische Maschinen oder computerisierte Automaten sein. Werkzeuge verlängern und verstärken die Organe des Menschen. Bei computerisierten Automaten findet eine Funktionsteilung zwischen dem Arbeitsmittel und dem Nutzer statt. So vermag etwa das CAD-System

menschliche Funktionen zu übernehmen. Daraus entstehen im weiteren arbeitsgestalterische Fragen, die die psychischen Arbeitsanforderungen ausschlaggebend mitbestimmen (vgl. Hakker, 1996b). Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch nicht das gesamte CAD-System, sondern ausschließlich dessen Teilfunktion des Zeichnens näher betrachtet werden.

2.3.1 Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift

Bei einer Skizze handelt es sich um eine „vorwiegend freihändig erstellte Zeichnung, die mit einem hohen Grad an Spontaneität entsteht“ (DIN 199-3, 1984). Sie ist ein essentielles Element im Entwurfsprozess. Als unmittelbare und rasche physikalische Fixierung auch vager Konstruktionsideen steht sie am Anfang eines jeden Entwurfs und begleitet diesen bis zum endgültigen Produkt. Papier und Bleistift sind dabei „Verstärker der menschlichen schlussfolgernden Fähigkeiten“ (Bruner, Over & Greenfield, 1971, 83). Neben der externen Darstellung dienen sie als kognitives Werkzeug der Er- bzw. Bearbeitung von Informationen im Sinne eines „thinking through the end of the pencil“ (Purcell, 1998, 185; vgl. Norman, 1989).

Das Design Problem Solving beinhaltet die mentalen Prozesse des Umstrukturierens der ursprünglichen Konzeption und des Kombinierens. Da diese Formen der Verarbeitung in der mentalen Vorstellung schwierig zu leisten sind, beginnen Konstrukteure in der Regel spontan mit dem Skizzieren (Verstijnen & Hennessey, 1998). Verschiedene Autoren nehmen an, dass der Problemlöser sich dann für das Skizzieren entscheidet, wenn die kreative Verarbeitung auf die Begrenzung seiner kognitiven Ressourcen trifft, d. h., wenn die Operationen nicht innerhalb der mentalen Vorstellung allein oder effektiver external durchgeführt werden können (z. B. Anderson & Helstrup, 1993; Verstijnen et al., 1998). Das Skizzieren verkörpert hierbei eine Erweiterung der Vorstellung zur Überprüfung der mentalen Simulation. Die Funktion der Analysehilfe bezieht sich auf die frühzeitige Problemerkennung, das Vermeiden von Denkfehlern und damit auf die Reduzierung von Fehlhandlungen und -entscheidungen (siehe z. B. Riemer, 1996; Sachse et al., 1996; Sachse et al., 1997). Die Eigenschaften und Konsequenzen verschiedener Lösungsideen lassen sich mit Hilfe einer bildlichen Darstellung präziser beurteilen, so dass Skizzen als „Prüfstein für interne bildliche Vorstellungen“ (Rutz, 1985, 38; vgl. auch Tjalve & Andreasen, 1975) dienen. Eine Unterstützung der Entwicklung komplexer, dreidimensionaler Lösungen gestaltet sich jedoch meist als schwierig, da perspektivische Skizzen hohe Ansprüche an die Zeichenfertigkeit des Entwerfenden stellen.

Experimentelle Beobachtungen zeigen, dass Entwerfende, wenn sie anfangen zu Skizzieren, nur wenige Details ihrer zukünftigen Skizze kennen, denn „... ´knowing` is in the observing of the external sketch” (Ballay, 1987, 71). Die Lösungsgedanken und -ideen, welche sich im ka-

pazitätsbegrenzten Arbeitsgedächtnis befinden, werden externalisiert, und die Skizzen damit als erweitertes Gedächtnismedium zu einem Langzeitspeicher. „Die Informationen dieses Speichers werden erneut ´abgegriffen` durch die visuelle Wahrnehmung und in das Gedächtnis eingelesen, sie werden bewertet und der Bearbeitung durch weitere Denkoperationen zugeführt. ... Dieser Entwicklungsprozess ist so etwas wie ein ´Selbstgespräch` mit Rückantwort; er ist ein iterativer Prozess des Annäherns von Ziel- und Lösungsvorstellungen an die Lösung“ (Uhlmann, 2000, 79).

Schön et al. (1992) betonen die Bedeutung von Freihandskizzen als einem entscheidenden Instrument zur reflexiven Konversation des Konstrukteurs mit seinen eigenen Ideen und seinem „stillen Wissen“ (sog. „reflection-in-action“; s. dazu Dorst & Dijkhuis, 1996; vgl. auch Fish, 1994). Das bedeutet: „Die Entwurfsskizze widerspiegelt nicht nur das Ergebnis des Denkens des Konstrukteurs, sondern dient ihm in erster Linie als Arbeitsmittel“ (Görner, 1994, 240). So sind die Organisation der kognitiven Repräsentationen des Entwerfenden und die Strukturen und Eigenschaften der „Ideen-Skizzen“ in dialektischer Weise voneinander abhängig (Kavakli et al., 1998; Fish & Scrivener, 1990). Diese Art von Skizzen, die Entwerfende nutzen, um nonverbales Denken und mentale Repräsentationen zu fokussieren und anzuleiten, nennt Ferguson (1993) „thinking sketches“. Herbert (1987, 265) definiert diese Produkte der Skizziertätigkeit als „informal, private drawings that ... designers use as a medium for graphic thinking in the exploratory stages of their work.“ Skizzen entstehen oftmals innerhalb weniger Sekunden, was darauf hindeutet, dass für diese Art der Darstellung keine grundlegenden Umformungen des Vorstellungsbildes notwendig sind. Uhlmann (1995, 2000) weist darauf hin, dass die motorischen Fertigkeiten des Arm-Hand-Finger-Systems derart ausgebildet sein müssen, dass sie der Schnelligkeit der Gedanken folgen und Lösungsideen adäquat festhalten können.

Zur Lösung der Problemstellung treffen Entwerfende eine ökonomische Wahl hinsichtlich der Ebenen dreier Dimensionen des Skizzierens: Inklusion, Kohärenz und Präzision (Ballay, 1987). Dabei bezeichnet die *Inklusion* den Grad an Detailliertheit und die *Kohärenz* den Grad, zu dem bestimmte Informationsteile mit anderen übereinstimmen. Die *Präzision* bezieht sich auf die dimensionale Verfeinerung, mit der eine intendierte Anordnung präsentiert wird. Dabei ist die Oberflächlichkeit einer Skizze die bewusste Wahl des Konstrukteurs: „Sketching is not so much the precursor of a drawing as it is the record of a thought. It is a way of controlling the information in the early representations of a design solution” (Ballay, 1987, 75). Bei der Entwicklung von Lösungsideen ist gerade diese vage, mehrdeutige Darstellung hilfreich für die Generierung von Assoziationen. Die „materialisierende“ Tätigkeit des Skizzierens zwingt zur Differenzierung und reduziert dadurch die – in Grenzen förderliche – Vieldeutigkeit unscharfer früher Lösungsansätze (Radcliffe, 1998).

Experimentelle Studien zur Analyse kognitiver Prozesse während des Entwerfens (z. B. Schön et al., 1992; Gero & McNeill, 1998; Goel, 1995; Suwa, Purcell & Gero, 1998) zeigen, dass das Freihandskizzieren bei gleichzeitiger Nutzung der entstehenden Skizze an sich zwei wichtige Zwecke erfüllt. „They (die externen Medien) are designed with flexibility in mind, because their most distinguished purpose is to aid the designer in generating and evaluating alternative ideas“ (Buur et al., 1989, 160). Erstens wirkt es sich unterstützend auf die Reinterpretation einer bildlichen Darstellung aus (Chambers & Reisberg, 1985; Goldschmidt, 1991, 1994, 1999; Goel, 1995; Purcell et al., 1998; Suwa, Tversky, Gero & Purcell, 2001). Wenn Konstrukteure im Entwurfsprozess innehalten und eine abstrakte, mehrdeutige oder unvollständige Skizze betrachten, interpretieren sie deren Inhalt nicht unbedingt erneut auf die gleiche Weise, sondern bringen ihn häufig in der darauffolgenden Skizze mit einer neuen Idee in Verbindung. Diese sog. lateralen Transformationen (Goel, 1995) dienen als Basis für einen opportunistischen Prozessverlauf.

Ein weiterer Nutzen kann nach Schön et al. (1992) als „unerwartete Entdeckung“ bezeichnet werden (vgl. auch Suwa, Gero & Purcell, 1999). Das Externalisieren einer Reihe von Ideen auf dem Papier zwingt zu räumlicher Organisation und Spezifität, die wiederum zu gänzlich neuen Entwurfsideen führen können. Die Skizze wirkt somit als „Kristallisationskeim“ (Viebahn, 1993, 9): „... previously unseen and unexpected connections reveal themselves to the mind“ (Langley & Jones, 1988, 177).

Beide Entwurfshandlungen sorgen durch das Verlassen habitueller Gedankenmuster für Diskontinuität und verkörpern damit einen Schlüssel zum kreativen Problemlösen (Weisberg, 1988; Hofstädter, 1985, zitiert nach Fish, 1994). Die Tätigkeit des Skizzierens unterstützt diesen Aspekt der Kreativität durch das ausschnittsweise Festhalten kognitiver Aktivitäten. „Zeichnen ist Spurenziehen“ (Uhlmann, Lehrmaterial) - über die Entstehung der Skizze lassen sich folglich lösungsrelevante Prozesse in ihrer Abfolge erfassen: „Die Skizze macht also den individuellen Lösungsweg sichtbar und bietet dem Beobachter die Möglichkeit, die gedankliche Befassung mit der Aufgabenlösung zu erkennen“ (Görner, 1974, 45).

2.3.2 Rechnergestütztes Entwerfen

Die rechnergestützte Arbeit in Entwicklung und Konstruktion beinhaltet neben der Informationsbereitstellung und dem Berechnen vor allem die zwei- und dreidimensionale Zeichnungserstellung und wird als Computer-Aided Design (CAD) bezeichnet. Zwar suggeriert die Abkürzung „CAD“ eine Unterstützung aller beim Konstruieren anstehenden Teilaufgaben durch den möglichst optimalen Einsatz der zur Verfügung stehenden informationstechnischen Hilfsmittel

in Form von Hard- und Software. Angestrebt ist eine vollständig integrierte Anwendung und Nutzung des Datenflusses im gesamten Produktentwicklungsprozess (Pahl, 1990; vgl. Feldhusen, 1989; Haasis, 1995; Vajna, Weber, Schlingensiepen & Schlottmann, 1994). Die Nutzung von CAD beschränkt sich jedoch bis heute vorwiegend auf die geometrisch-gestaltenden, algorithmierbaren Tätigkeiten in den Phasen des Entwerfens und Ausarbeitens, d. h., auf die graphisch-interaktive Erzeugung und Manipulation einer digitalen Objektbeschreibung bzw. -darstellung (Pahl, 1990; Knoop, 1996; Steger, 1998).
In der vorliegenden Arbeit wird nicht das gesamte CAD-System betrachtet, sondern die in den frühen Entwurfsphasen entscheidende Teilfunktion des Zeichnens. Das Erzeugen einer bildlichen Darstellung mit Hilfe eines CAD-Systems unterscheidet sich erheblich von dem Erstellen einer Freihandskizze. CAD-Programme können unvollständige Datenstrukturen nicht verarbeiten, so dass von Beginn an die Eingabe sämtlicher Abmessungen und Eigenschaften des zu konstruierenden Objekts notwendig ist. Sowohl die Auswahl eines Elements als auch die Bestimmung von dessen Ort und Lage erfolgt entweder mit der Maus aus einer durch Symbole auf der Benutzeroberfläche dargestellten Menge an Icons oder über die Tastatur. Mit 2D-CAD-Systemen entsteht am Rechner ein zweidimensionales Datenmodell, dessen Geometriedefinition linien- und flächenorientierte Elemente der Ebene umfasst. Die einzelnen Projektionen eines Teils als Ansichten oder Schnitte sind unabhängige Modelle der Realität im Rechner, deren widerspruchsfreie Verknüpfung durch die menschliche Interpretation erfolgen muss. Da die Arbeit mit 2D-CAD-Systemen vergleichbare Ergebnisse wie die konventionelle Arbeitsweise in Form von Skizzen, Entwürfen und Detailzeichnungen liefert, werden diese auch als zeichnungsorientiert bezeichnet (Vajna et al., 1994). Beim dreidimensionalen rechnergestützten Entwerfen lassen sich Körper durch drei exakte Koordinatenangaben oder aus zweidimensionalen, ebenen Flächen, die im Raum bewegt werden, erzeugen und miteinander kombinieren. Es entsteht ein vollständig beschriebenes, räumliches Modell des Objekts, das ähnliche Eigenschaften besitzt wie ein plastisches Modell aus Kunststoff oder Holz und ein frühzeitiges Kontrollieren sowie Analysieren der Arbeitsergebnisse erlaubt.

Bei dem in der vorliegenden Untersuchung verwendeten CAD-Programm *AutoCAD*® der Firma Autodesk handelt es sich um ein sehr weit verbreitetes System, das bei Konstruktionsprogrammen im Low-End- bis Mid-Range-Bereich eine führende Rolle einnimmt. Es hat sich zu einem Quasistandard bei CAD-Programmen entwickelt und ist branchenneutral, wird aber vorwiegend im Technik- und Architekturbereich eingesetzt. Hier dient es zumeist dem Erstellen zweidimensionaler Ansichten von dreidimensionalen Objekten. Um den Zeichner nicht einzuschränken, lassen sich jedoch auch realitätsgetreue dreidimensionale Modelle erzeugen. Die Abbil-

dung 3 zeigt das Hauptfenster von AutoCAD mit seinen Komponenten Menüleiste, Werkzeugkästen, Graphikfenster mit Fadenkreuz, Textfenster, Befehlszeile und Statusleiste.

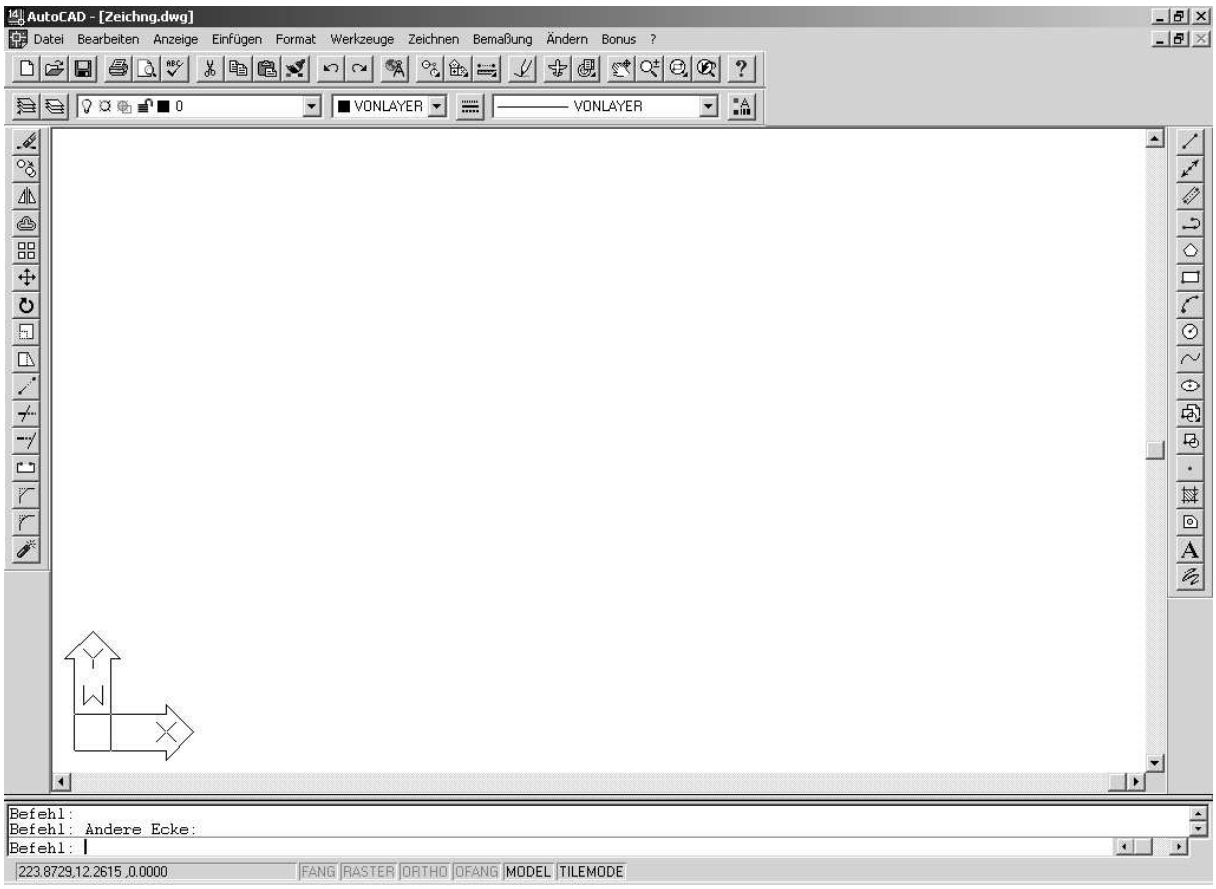


Abb. 3: Hauptfenster von *AutoCAD* mit Komponenten

Im *Graphikfenster* wird die Zeichnung angezeigt und bearbeitet; das *Textfenster* zeigt ein Protokoll der eingegebenen Befehle und Optionen. Das *Fadenkreuz* wird mit der Maus gesteuert und dient dem Finden von Punkten in der Zeichnung und dem Auswählen von Objekten. In der *Statusleiste* können die Koordinatenangaben des Fadenkreuzes und die aktuellen Einstellungen der Zeichnungshilfen abgelesen werden. Auf die Programmfunktionen kann man durch Befehle zugreifen, indem entweder eine Menüoption aktiviert, ein Werkzeug im Werkzeugkasten angeklickt oder ein Befehl eingegeben wird.

Die graphischen Darstellungen werden vom Benutzer im Dialog mit dem Programmsystem erzeugt. Mit einer formalen Eingabesprache, die aus geometrischen Grundelementen zur Beschreibung eines Konstruktionsobjekts und Funktionenen zur Modifikation der Beschreibung besteht, gibt der Benutzer dem Rechner Zeichnungsanweisungen. Im Vergleich zum Freihandskizzieren, bei dem der Entwerfende die Elemente durch eigenes (Er)finden generieren muss, wird hier standardisiertes Material für den Lösungsprozess bereitgestellt. Mit dem kodierten

Befehlsvorrat des Systems lässt sich eine Vielzahl an Elementen erstellen, angefangen bei Linien und Kreisen bis hin zu Splines und Ellipsen. Damit baut der Nutzer die intendierte Produktdarstellung auf dem Bildschirm und gleichzeitig als Datenstruktur eines rechnerinternen Modells auf.
In AutoCAD wird alles in Originalgröße in den festgelegten Maßen gezeichnet. Das bedeutet, man erzeugt damit eine maßstäbliche Zeichnung, die die wahren Dimensionen im entsprechenden Verhältnis zueinander abbildet. Der Ansichtsmaßstab der Zeichnung ist beliebig skalierbar. Durch die „Zoom"-Funktion lassen sich Zeichnungsausschnitte für Detailarbeiten vergrößern oder die Anzeige verkleinern, um die komplette Zeichnung anzuzeigen. Das gesamte technische Gebilde kann in ein und derselben Zeichnung entworfen und bearbeitet werden, so dass die bei der Handskizze erforderliche separate Darstellung von Detailausschnitten entfällt.
In einer Zeichnung erstellte Objekte lassen sich durch eine Vielzahl an Manipulationsmöglichkeiten bearbeiten - etwa in eine andere Position verschieben, ausrichten, drehen, spiegeln, kopieren oder löschen. Zur besseren Organisation der Zeichnung können Farben und Layer (Transparentauflagen) genutzt werden. Zur Beschriftung, Kennzeichnung von Teilen der Zeichnung und zum Einfügen von Spezifikationen und Anmerkungen kann man Textfelder verwenden. Durch das Abspeichern ist eine einfache Wiederverwendung der Konstruktionsdaten gewährleistet. Weitere Informationen sind dem Benutzerhandbuch *AutoCAD Release 14* von Autodesk (1997) zu entnehmen.

Es gilt zu beachten, dass die mit CAD erzeugten Darstellungsformen bereits bei der Ersteingabe in Form von quantitativen Festlegungen vollkommen definiert sind und dem Visualisierten eine konkrete Form geben. Dies führt zu einer großen Genauigkeit und Sauberkeit der Darstellung. Der Prozess der Entstehung des Entwurfs ist dadurch allerdings nicht sichtbar und kann auch zu einem späteren Zeitpunkt nicht nachvollzogen werden. Darin besteht ein Hauptproblem für den Nutzer von CAD-Programmen: „... difficulties of maintaining faith in an output in which the traces of process are missing" (Henderson, 1999, 136).
Die Definition von Freiformgeometrien ist nach wie vor nicht oder nur stark eingeschränkt möglich. Mit der Skizzierfunktion bei CAD-Systemen versucht man, die Tätigkeit des Freihandskizzierens auf die Arbeit am Rechner zu übertragen. Dabei erstellt der Konstrukteur mit Hilfe der Maus oder einem Lichtgriffel eine Freihandskizze. Dazu klickt man auf die Auswahltaste der Maus, um den „Stift" anzusetzen, zeichnet dann durch Bewegen derselben Freihandliniensegmente mit vorher festgelegter Länge und klickt erneut, um den „Stift" wieder abzuheben und den Zeichenvorgang zu beenden. Skizziermodule von CAD-Systemen werden jedoch in aller Regel lediglich als Eingabehilfe und nicht als Werkzeug zur konzeptuellen Lösungs-

entwicklung genutzt. Die Möglichkeit, erste Entwurfsideen zu skizzieren und direkt für den Entwurfsprozess zu verwenden, ist bis heute nicht uneingeschränkt gegeben (Liu, 1995). Daher gibt Viebahn (1995, 539) folgende Empfehlung: „Vernünftigerweise setzt sich ein Konstrukteur erst dann an den Computer, wenn sich seine Vorstellung von dem darzustellenden Objekt gefestigt hat. Dahin gelangt er mit Handskizzen, denn er weiß, dass ihm die Gedanken beim Skizzieren fast von selbst aus der Hand fließen - und zwar bequemer als beim Zeichnen mit der Maus."

2.3.3 Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett

„Die heutige Manipulation von Geometriedaten über alphanumerische Tastatur und Maus entspricht der Frühzeit des PC, als der Rechner eine sehr komfortable Schreibmaschine war. Es ist ein anachronistischer Widerspruch, wenn beim heutigen Stand der Hard- und Softwareentwicklung Geometriedateneingabe und -bearbeitung immer noch vorzugsweise mit solchen vorwiegend textkompatiblen Werkzeugen erfolgt" (Uhlmann & Feuchtenberger, 2000, 18).

Das rechnergestützte Entwerfen mittels Maus und Tastatur hat die spezifischen lösungsdienlichen sensumotorischen Funktionen des Freihandskizzierens für die Lösungsentwicklung nicht übernommen. Unzulänglichkeiten in der Nutzung digitaler Systeme müssen durch den zusätzlichen Einsatz aufwandsarmer Unterstützungsformen kompensiert werden. Görner (1974, 139) betont: „Bei der Entwicklung zukünftiger Mensch-Rechner-Dialogsysteme sollte die Skizze bzw. Zeichnung wegen ihrer Bedeutung bei der Entstehung der Lösungsgedanken und deren Entwicklung prinzipiell erhalten bleiben."
Der Prozess des Entwerfens ist bis heute in den frühen Phasen eine „Domäne der Handarbeit" (Grundmann & van Maanen, 1999, 84): Die Entwürfe werden zunächst auf Papier gezeichnet, um sie dann in ein CAD-System einzugeben. Der häufige Wechsel zwischen analogen und digitalen Arbeitsmitteln hat in der Regel Fehler und Informationsverluste bei der Übertragung zur Folge. Mit den Skizzen werden redundante Informationsspeicher aufgebaut, die im Laufe des Entwurfsprozesses mangels gegenseitiger Anpassung differieren können (Rückert, 1997). Techniken wie das Scannen erbringen keine direkte Verbindung zwischen dem analogen und dem digitalen Bereich. „So dürfte ein erhebliches Unterstützungspotential im Wechsel zwischen dem traditionellen Skizzieren und der raschen digitalen Weiterverarbeitung der Geometrien enthalten sein ..." (Sachse, Leinert & Hacker, 2001a, 29).
Um eine hohe Konstruktionsqualität bei niedrigen Kosten zu erreichen, ist vor allem eine Digitalisierung der konzeptionellen Stufen des Entwurfs erstrebenswert. Nötig sind Integrations-

möglichkeiten, die den freien graphischen Entwurf an den Anfang einer kompletten und integrierten Prozesskette stellen: „Weil die Prinzipien der Ergonomie immer noch nicht genügend beachtet werden, besteht die Forderung darin, die Trennung von mit der Hand gestaltetem Medium wie Papier auf der einen Seite und den digitalen Medien der Soft- als auch Hardware auf der anderen Seite aufzuheben und deren Kooperation endgültig in die angeboren menschlich-natürliche Art des Arbeitens zu überführen“ (Grundmann et al., 1999, 82). Ziel ist es, den Rechner durch modernste Entwicklungen der Bedientechnologie zum aktiven Partner im Entwurfsprozess zu machen.

Eine durchgängige Nutzung von Rechnersystemen, die ohne „Medienbruch“ einen Wechsel zwischen einer kontinuierlichen Konkretisierung der Produktidee und bei Bedarf einer erneuten Abstraktion ermöglichen, wird durch einen innovativen LCD (Liquid Crystal Display)-Monitor mit integriertem Graphiktablett angestrebt, dessen Bedienung sich an den Eigenschaften herkömmlicher Handskizzen orientiert: Man zeichnet, skizziert und schreibt mit einem speziellen kabel- und batterielosen Stift, der auf der drucksensitiven Bildschirmoberfläche verschiedene Strichstärken erzeugt. Dieser sog. UltraPen ist ergonomisch konzipiert; er beinhaltet am oberen Stiftende einen Radierer und seine Stiftspitze kann ausgewechselt werden. Eine separate Maus für Funktionen wie das Klicken und die Navigation in Anwendungen ist überflüssig. Die entsprechenden Eingaben erfolgen über den Stift direkt auf dem Bildschirm. Das interaktive Display funktioniert nach dem elektromagnetischen Resonanz-Prinzip, d. h., es werden Radiowellen zum Stift gesendet und zu dessen Positionsanalyse sowie zur Bestimmung anderer, durch den Druck der Stiftspitze erzeugter Informationen, empfangen. In einer Toolbox, die wunschgemäß überall auf dem Bildschirm positioniert werden kann, lassen sich durch einfaches Anklicken mit dem UltraPen verschiedene Strichstärken, Stiftarten und Farben wählen. Durch die Bedienung entsprechender Symbole kann man entweder den letzten generierten Schritt oder den gesamten Bildschirminhalt rückgängig machen. Das Radiergummi-Symbol dient dem Löschen eines kompletten Linienzugs. Es können jedoch auch kleinste Details korrigiert werden. Die erstellten Skizzen lassen sich als Dokument für den weiteren Gebrauch als Ink- oder BMF-File speichern, mailen und wieder öffnen. Diese Form der elektronischen Wissenserfassung ermöglicht es multinationalen Unternehmen, ihre verteilten Entwicklungs- und Fertigungsstandorte und die ihrer Partner durch die zentrale Speicherung und die damit verbundene Verfügbarkeit zu koordinieren.

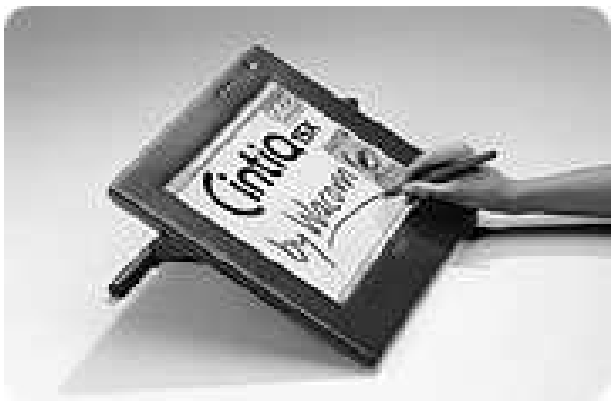


Abb. 4: *Cintiq 15X* von WACOM

Marktführer in der Entwicklung, Herstellung und dem Vertrieb von Graphiktabletts ist mit bisher mehr als zwei Millionen verkauften Geräten und drei Produktlinien weltweit die Firma WACOM. Das Unternehmen hat das erste hochauflösende Graphiktablett und die ersten batterie- und kabellosen, drucksensitiven Stifte entwickelt. Rund 80 % der zum Zeichnen sowie im Graphik-Video-Bereich eingesetzten Tabletts stammen von WACOM. Als Anwendungsgebiete werden z. B. die Architektur, der konstruktive Maschinenbau, das Design, aber auch der Audio- und Video-Bereich sowie die Medizin genannt.

Im Konstruktionsbereich existiert die Idee, auf dem Graphiktablett erzeugte Freihandskizzen in exakte CAD-taugliche Geometrie umzuwandeln, indem das System die Freihandlinien durch mathematisch beschreibbare Elemente (Geraden, Kreisbögen, Kurven) annähert und ersetzt. Wird die derart generierte Geometrie gleichzeitig parametrisiert, lässt sie sich durch Änderung der Parameter modifizieren und variieren (Für detaillierte Informationen zur Handskizzeneingabe und -erkennung s. Jansen & Timmermann, 1987; Grabowski & Pätzold, 1988; Liu, 1995). Dadurch würden Anpassungen der Konstruktion an die kundenspezifischen Bedürfnisse schnell und mit geringem Aufwand möglich. In Verbindung mit CAD-Programmen ergäbe sich somit eine wechselseitige Überführung von bildlich-anschaulichen in abstrakt-symbolhafte Darstellungsformen. Die Nutzung aller im CAD gängigen Funktionalitäten würde zudem ein Testen der Konstruktion erlauben, indem man mit ihr interagiert.
Bislang sind die in der Konzeptphase mittels Prinzipskizzen erarbeiteten Informationen aufgrund ihrer Datenstruktur (geringer Konkretisierungsgrad, mangelnde Genauigkeit und Maßstäblichkeit) nicht direkt als geometrische Umsetzung für die Produktgestaltung zu übernehmen (Langner, 1991). Als problematisch erweist sich die Erkennung der vom Konstrukteur intendierten impliziten Restriktionen. So besteht z. B. bei Mehrdeutigkeiten der handskizzierten Eingaben und bei mangelnder Separierung zwischen Geometrie und Annotation die Gefahr von

Fehlinterpretationen. Eine Untersuchung der Möglichkeiten zur Verarbeitung mit momentan verfügbaren Vektorisierungsprogrammen im Konstruktionsbereich ergab die Notwendigkeit zur aufwendigen Nachbearbeitung durch den Nutzer (Reinsch, 1997). Im folgenden sind einige erste erfolgversprechende Ansätze für interaktive Tools genannt, die jedoch bisher nur unter idealen Bedingungen zur Erstellung wenig komplexer konstruktiver Abbildungen verwendet werden können: CASUS (Jansen & Krause, 1984; Jansen, Nullmeier & Roediger, 1985; Jansen et al., 1987), Design Capturing System (Hwang & Ullman, 1990), Cocktail Napkin (Gross, 1994), SILK (= Sketching Interfaces Like Krazy, Landay & Myers, 1995).

Im Designbereich - speziell beim Entwurf von ästhetischen Körpern mit ausgesprochenem Freiformflächencharakter - kommen zunehmend Flächenbeschreibungsprogramme wie *ALIAS Wavefront, ICEM-Surf* oder *Rhinoceros* zum Einsatz. Diese erlauben in der Regel die direkte skizzierende Eingabe so, dass eine anschließende Weiterbearbeitung mit 3-D-CAD möglich ist[1].
Bisher wurde diese Funktion in der Praxis kaum genutzt, da die für die nötige feinmotorische Steuerung der Liniencharakteristik nötige Hardware nicht vorhanden war. Mit der Überwindung dieser technischen Hürde durch Geräte wie das WACOM *Cintiq 15X* kann diese Eingabemöglichkeit jedoch bald wesentlich intensiver genutzt werden.
Die CAD-Arbeitsweise in den Bereichen Design und Konstruktion unterscheidet sich insbesondere durch die Komplexität von Freiformflächen und deren ästhetischen Anspruch. Es ist daher zu testen, ob die entsprechenden Funktionalitäten dieser flächenorientierten Programme für den Konstruktionsbereich übernommen werden sollen.

---

[1] Das Ende der graphischen Entwurfsphase im Designprozess ist gekennzeichnet durch die möglichst weitgehende geometrische Beschreibung des zu schaffenden ästhetischen Körpers in Form von Ansichtsdarstellungen und Schnitten. Die darin enthaltenen Geometrieinformationen und das gesamte, also auch nicht externalisierte Wissen des Designers um die Geometrie (subjektinternes Geometriemodell, Uhlmann & Richter, 1994) bilden die Grundlage für den Aufbau des Flächenmodells. Diese graphischen Darstellungen werden digitalisiert und als Bitmap-Bild in den Hintergrund der jeweiligen Ansicht gestellt. Mit dem UltraPen kann nun die zu vektorisierende Kurve direkt nachgezeichnet werden. Das Resultat dieses Vorgehens ist ein Typ Spline, der mehr oder weniger der Kurve des Bitmap-Bilds entspricht.

3 Gesamtfragestellung

Die im Kapitel 2 geschilderten Befunde und Erkenntnisse führen zu der folgenden Gesamtfragestellung, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit beantwortet werden soll:
Welches Unterstützungspotential bieten die Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“, „Graphiktablett“ und „CAD“ in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens?

Dabei werden zunächst Fragen zur Nutzung der verschiedenartigen Arbeitsmittel und den damit verbundenen Erfahrungen der Entwerfenden betrachtet. Diese Punkte sollen mittels einer orientierenden Befragungsstudie (s. Kapitel 6) eruiert werden.
Um Untersuchungsergebnisse zu erhalten, die eine Beantwortung der obengenannten Kernfrage zulassen, entschied man sich für ein laborexperimentelles Untersuchungsdesign. Mittels einer experimentellen Pilotstudie (s. Kapitel 7) versuchte man der Frage nachzugehen, ob die ausgewählten Problemstellungen und Methodiken für einen Einsatz in der Hauptuntersuchung geeignet sind. Die Fragestellungen und Hypothesen der experimentellen Hauptuntersuchung (s. Kapitel 8) betreffen die Unterschiede der Arbeitsmittel in ihrem Unterstützungspotential durch eine differenzierte Betrachtung der drei Bereiche „Ergebnisse“, „Erleben“ und „Prozess“.

4 Analyse der psychischen Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten beim Einsatz der Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsphasen aus tätigkeitspsychologischer Sicht

Der Vergleich der unterschiedlichen Arbeitsmittel bezieht sich in der vorliegenden Arbeit immer auf den Vergleich der Anforderungen, die diese Arbeitsmittel an den Nutzer stellen. Auf der Grundlage der in der Literatur dargestellten Befunde und der Beschreibung der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift", „Graphiktablett" sowie „CAD" im Teilkapitel 2.3 sollen im folgenden deren psychische Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten bei einem Einsatz in den frühen Entwurfsphasen beleuchtet werden. Aus der Kombination der formulierten Anforderungen des Entwerfens einerseits und der hypothetischen Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten der Arbeitsmittel an den Nutzer andererseits lassen sich Hypothesen über das Unterstützungspotential dieser Arbeitsmittel ableiten.
Im Teilkapitel 2.2 wurden das Arbeitsgedächtnis, die mentalen Problemrepräsentationen sowie das Externalisieren von Ergebnissen internalen Handelns als potentielle Problemkreise benannt, die vor allem in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens einer Unterstützung bedürfen. Diesen drei Bereichen lassen sich aus tätigkeitspsychologischer Sicht hypothetische Anforderungen an Arbeitsmittel zuordnen, die für eine optimale Unterstützung des Entwerfens erfüllt sein sollten. Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei einigen Anforderungen keine eindeutige Zuordnung zu nur einem Problembereich möglich war, da diese zwei oder gar alle drei Aspekte betreffen.

4.1 Arbeitsgedächtnis

4.1.1 Okkupieren geistiger Kapazität durch die Arbeitsmittelnutzung

Die Begrenztheit der menschlichen Bewusstheitskapazität, des sog. Arbeitsgedächtnisses, erfordert Entlastungen, die kaum mentale Kapazität okkupieren (Hacker, 1998b). Die Nutzung von Papier und Bleistift bindet durch ihre einfache und flexible Handhabbarkeit nahezu keine geistige Kapazität. Das Entwerfen mit dem Graphiktablett ist durch den drucksensitiven Ultra-Pen an dieses intuitive und natürliche Arbeiten angelehnt, es sind jedoch je nach Komplexität der ausgewählten Software unterschiedliche Funktionalitäten vorhanden. Deren Anwendung fordert in Abhängigkeit von der Selbsterklärungsfähigkeit des Programms zumindest zu einem gewissen Teil die Aufmerksamkeit des Entwerfenden und unterbricht durch die Bedienung den eigentlichen Entwurfsprozess. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das Entwerfen

durch Freihandskizzieren mit beiden Arbeitsmitteln ausreichende Skizzierfertigkeiten verlangt, um die Belastung der mentalen Kapazität zu minimieren.

Im Vergleich dazu entspricht die Hard- und Software aktueller CAD-Systeme nur selten den notwendigen Anforderungen hinsichtlich einer Entlastung des Arbeitsgedächtnisses. Viebahn (1996, 8) konstatiert: „Zwischen dem, was Konstruktionsprogramme können und dem, was in der Realität beim Konstruieren abläuft, gibt es nur geringe Überschneidungen. Die Benutzer ... werden von der Menge der Daten und der Art der Eingabe überfordert." Vor allem das Tätigkeitsfeld der Ersteingabe ist durch die mangelnde Qualität der Schnittstellengestaltung nicht an die gewohnte Vorgehensweise angepasst. Allgemeine Anforderungen an die Schnittstelle zwischen dem Menschen als Nutzer mit einer natürlichen Sprache und dem Rechner als Interaktionsmittel mit einer Maschinensprache sind Benutzerfreundlichkeit und kurze Antwortzeiten, die in der DIN EN ISO 9241-10 (1996) durch die Kriterien *Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit*, *Steuerbarkeit*, *Erwartungskonformität* und *Fehlerrobustheit* präzisiert werden. Demnach soll der Dialog die Erledigung der Arbeitsaufgabe des Benutzers effektiv und effizient unterstützen. Dieser soll sich ausschließlich der eigentlichen Problemlösung widmen können und keiner Belastung durch Steuerung notwendiger rechnerinterner Vorgänge unterliegen (vgl. dazu auch Card, Moran & Newell, 1983; Hacker, 1987; Geiser, 1990; Downtown & Leedham, 1993; Schönpflug, 1993; Preece, 1999).

Beim Umgang mit einem CAD-System muss der Entwerfende jedoch bereits in den frühen Phasen zahlreiche zusätzliche Informationsquellen beachten, da neben der graphischen Darstellung die Menüsteuerung eingeblendet ist. Die mangelnde Intuitivität der Benutzeroberfläche in Form einer unnatürlichen Kommandosprache behindert die Eingabe und Manipulation von Informationen. Die Menüstrukturen sind auch bei routinierter Bedienung eines Systems komplex, und das benötigte prozedurale Wissen ist im Vergleich zur konventionellen Arbeitsweise sehr umfangreich und durch häufige System- oder Versionswechsel ständigen Änderungen unterworfen (Frieling & Hilbig, 1990). Der reibungslose Umgang mit dem CAD-System verlangt, dass sich der Konstrukteur permanent zahlreiche neue Kenntnisse, etwa über dessen Bedienung, aneignen muss. Das Wissen über die Dialogstrukturen muss aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen werden, wohingegen die ständigen Abfolgen von Eingaben und Befehlen im Kurzzeitgedächtnis abgespeichert sind. Der Dialogablauf erfordert häufig unnötige gedankliche Leistungen in der Handhabung und kann durch vielfältige Interaktionsprobleme zu einer unproduktiven CAD-Benutzung führen, bei der die eigentlichen Systemvorteile nur selten ausgeschöpft werden (Streitz, 1990; Pfitzmann & Jin, 1992; vgl. software-ergonomische Kriterien zur Dialoggestaltung, DIN 66 234-8, 1988). Es ist anzunehmen, dass undurchsichtige Bedienungsprozesse mit mathematisch- und informatikorientierter Funktionalität vor allem bei unre-

gelmäßiger Arbeit mit dem CAD-System das Arbeitsgedächtnis erheblich belasten. Durch den entstehenden Trade-Off zwischen Problembearbeitung und Systembedienung wird mentale Kapazität vom eigentlich zu bearbeitenden Problem abgezogen: „Um ein Bild oder einen Gedanken im Computer zu speichern, muss der Konstrukteur einen nicht geringen Teil seiner geistigen Kapazität dem Gerät widmen“ (Viebahn, 1995, 53).

Das rechnergestützte Entwerfen bringt durch verschiedene typische Rechnerfunktionalitäten jedoch auch entlastende Aspekte für die Mentalkapazität mit sich. Im Gegensatz zum Entwerfen mit Papier und Bleistift und mit gängiger Software für das Graphiktablett können hier Lösungen aus vorgegebenen Elementen integriert werden. Ferner verhindern die Möglichkeiten des Kopierens und Spiegelns etc. ein aufwendiges Mehrfachzeichnen. Allerdings birgt die Standardisierung von Baugruppen und Einzelteilen sowie die Möglichkeit der einfachen Vervielfältigung die Gefahr der Reduzierung individueller, kreativer Vorgehensweisen zugunsten formeller und leicht kontrollierbarer Abläufe.

Zur Vermeidung von Fehlhandlungen spielt die Antizipation von Folgen der Handlungsausführung eine entscheidende Rolle. Im Vergleich zur Externalisierung mit einem Stift erfordert die Eingabe mit Tastatur und Maus eine erhöhte Konzentration, um z. B. das Drücken einer falschen Taste zu umgehen (Frieling et al., 1990; Williges & Williges, 1984). Andererseits lassen sich sowohl beim rechnergestützten Entwerfen als auch beim Entwerfen mit Graphiktablett fehlerhafte Eingaben in der Regel mit geringerem Aufwand beheben und Veränderungen an den Entwürfen leichter vornehmen, als dies beim Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ der Fall ist. Hier gestalten sich Modifizierungen in einem fortgeschrittenen Entwurfsstadium als schwierig; bestimmte Merkmale der Konstruktion müssen immer wieder neu gezeichnet werden.
Vor allem aber verlangt die Bediensystematik beim Entwerfen mit AutoCAD, dass man sich die Grobgestalt und Modellierung vor der Eingabe klarmacht, um die eigentliche Bildschirmarbeit nicht ständig für derartige Überlegungen unterbrechen zu müssen (Viebahn, 1993, 1996): „Alle CAD-Systeme haben ihre Wurzel im Zeichnen, als dem einfachsten, ausführenden und dokumentierenden Teil der Arbeit, der erst dann an der Reihe ist, wenn vorher nachgedacht oder ´erfunden` wurde“ (Buss, 1989, 28). Dadurch wird die mentale Kapazität zu einem sehr hohen Ausmaß beansprucht. Beim Entwerfen durch Freihandskizzieren wird diese intellektuelle Leistung hingegen weitestgehend im Handlungsverlauf erbracht (Wingert, 1984).

4.2 Mentale Problemrepräsentationen

4.2.1 Kompatibilität von mentalen Modellen und Bedienoperationen

Das Entwerfen erfordert den Aufbau zutreffender und hinreichend vollständiger Problemrepräsentationen, die den Suchraum für Lösungen bilden und je nach Entwurfsfortschritt einen sehr unterschiedlichen Abstraktionsgrad besitzen. Es ist geprägt durch ein ständig erneutes Verkleinern und Vergrößern des Lösungsraums. Das bedeutet, die Aufmerksamkeit des Bearbeiters wird wechselnd vom Ganzen zum Detail und vice versa gelenkt. Dieser Sachverhalt wird bei der Arbeit mit CAD durch die Funktionalität des Zoomens unterstützt (Rutz, 1985).

Menschen denken in einem bestimmten Zeichenvorrat und strukturieren ihr Wissen in verschiedener Weise. Beim Entwerfen durch Freihandskizzieren verfertigt der Entwerfende seine Ideen entsprechend der Kopplung von manueller Tätigkeit und gedanklicher Vorstellung durch die dem Aufbau der internen Wissensrepräsentation analogen Handlung. Beim Entwerfen mit AutoCAD tritt jedoch eine Verbalisierung in der Bediensprache dazwischen. Die zur Bedienung des Rechners erforderliche Sprache unterscheidet sich mit ihren Worten und Zeichen in strikt sequentieller Struktur von der bildhaft orientierten Fachsprache des Konstrukteurs, der zur Aufwandsminimierung vorzugsweise gemischte Strategien anwendet (Hacker, 1989).

Die Problemlöseleistung eines Entwerfenden hängt deutlich davon ab, inwieweit die Anforderungen und das Informationsangebot im Hinblick auf den Zeichenvorrat und die Strukturiertheit mit seinem internen Vorrat übereinstimmen. Jeder Kodieraufwand erhöht die Belastung der mentalen Kapazität und reduziert damit die Aufmerksamkeit für die eigentliche Problembearbeitung (Krause & Sommerfeld, 1984; Müller, 1986b).

Im Umgang mit dem Rechner benötigte Fähig- und Fertigkeiten unterscheiden sich in essentieller Weise von den visuellen Fertigkeiten beim Freihandskizzieren, da sie nahezu keine Beziehung zu bildhaftem Denken aufweisen. Als intellektuelle Fertigkeiten handelt es sich hierbei um Kompetenzen, die Abstraktion, Schlussfolgern und prozedurales Denken umfassen (Zuboff, 1988). Die derzeitige Vorgehensweise beim Konstruieren mit CAD-Systemen ist dadurch geprägt, dass der Konstrukteur ein in seiner Vorstellung vorhandenes Gebilde nicht direkt übertragen kann (vgl. dazu Dutke, 1994). Das hierarchisch festgelegte Funktionsmenü zwingt den Nutzer, einer bestimmten Ablauflogik zu folgen: Die Dialogstruktur des CAD-Systems gibt eine systemspezifische Vorgehensweise vor, welcher der Nutzer zu folgen hat. Er ist gezwungen, sein mentales Modell gedanklich in formale Elemente (Volumen, Flächen, Linien und Punkte) zu gliedern, so dass es mit verfügbaren CAD-Funktionen generierbar ist. Durch die im Vergleich zum Entwerfen durch Freihandskizzieren veränderte Vorgehensweise ist vermutlich der Aufbau eines modifizierten mentalen Modells erforderlich: Der Konstrukteur muss neben dem bildhaft-analogen Geometriemodell ein eher proportionales Modell aufbauen, das den im

semantischen Gedächtnis gespeicherten Funktionsvorrat und die Menüstruktur enthält. Das mentale Modell wird in Form von Bauteilen und Baugruppen sichtbar in konkrete Gestaltungen umgesetzt und in einem mathematischen Modell abgespeichert, um die Nutzung der Eingabedaten für die weitere rechnerinterne Verarbeitung zu ermöglichen. Eine den gedanklichen Vorstellungen des Konstrukteurs angepasste sinnliche Wahrnehmbarkeit der rechnerinternen Modelldarstellung des zu konstruierenden Objekts ist nicht hinreichend gewährleistet (Hartmann & Eberleh, 1991).

Während die Entstehung des mentalen Modells beim Freihandskizzieren weitestgehend im Handlungsverlauf durch die Tätigkeit des Skizzierens selbst gefördert wird, muss bei der Arbeit mit CAD diese gedankliche Leistung wegen der erforderlichen Konkretheit größtenteils vor dem Beginn der Externalisierung erbracht worden sein. Zwischen dem konventionellen Handlungsvollzug und dem am CAD-System bestehen erhebliche Unterschiede insofern, dass je nach Art des Arbeitsmittels bestimmte Teilhandlungen möglich, erforderlich oder überflüssig sind. Der Rechner fordert im Vergleich zur manuellen Arbeitsweise andere Operationen vom Konstrukteur, die aber in der Regel zum gleichen Ergebnis - z. B. zur Entwurfszeichnung - führen. Es stellt sich die Frage, inwieweit die Normierung der Informationseingabe in rechnerkompatibler Form sowie vom Rechner angebotene Information mentale Kapazitäten vom Problemlöseprozess abziehen. So führt z. B. bei zahlreichen Freiheitsgraden in den frühen Phasen eine große Anzahl notwendiger Transformationen bei der Generierung eines Geometrieelements zu einer starken Belastung der Mentalkapazität.

4.2.2 Wechsel des Abstraktionsgrads und der Modalität der Darstellung

Beim Entwerfen mit den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ lassen sich Informationen im Sinne von „graphischen Metaphern“ (Herbert, 1987) auf unterschiedliche Weise darstellen. Handskizzen sind momentan das Werkzeug, das sich am ehesten zur Festlegung von Produktdefinitionen mit hohem Abstraktionsgrad eignet (Pache, Lindemann, Römer & Hacker, 2001). Sie können in Abhängigkeit vom Entwurfsstadium und -zweck im Hinblick auf die Präzision und Förmlichkeit als rein qualitative oder ungefähr quantitative Darstellungen provisorisch bis vollendet erscheinen (Black, 1990). Fish (1994) beschreibt das Skizzieren als Ausdruck selektiver Aufmerksamkeit: Während in einigen Skizzen nur die grobe, räumliche Struktur abgebildet ist, wird diese in anderen zugunsten eines Details vernachlässigt. Auch kann ein und dieselbe Skizze Skizzierelemente mit völlig unterschiedlichen Präzisionsgraden enthalten. Die Bandbreite an Informationen in einer konzeptionellen Handskizze kann weit über die eines entsprechenden CAD-Modells hinausgehen (Pache et al., 2001): Neben rein geometri-

schen Informationen können Skizzen auch funktionelle Festlegungen auf einem hohen Abstraktionsgrad enthalten. Häufig findet sich in Skizzen die Darstellung kinematischer Eigenschaften oder verschiedener Zustände eines Systems. Ergebnisse aus wahrnehmungspsychologischen Experimenten belegen, dass ein mögliches Übergehen augenblicklich nicht relevanter Eigenschaften den Vergleich interessierender Merkmale erleichtert (Dixon & Just, 1978).

Durch den unproblematischen Wechsel zwischen abstrakt-symbolhaften und bildlich-anschaulichen Repräsentationsformen ist ein stufenweiser, der mentalen Repräsentation des Entwerfenden angepasster Abstraktionsprozess möglich (Ehrlenspiel & Rutz, 1987). Bei Bedarf lassen sich in Form eines multimodalen Darstellens zu bildhaften begriffliche Informationen auf höchstmöglichem Abstraktionsgrad ergänzen, welche die benannten Elemente geometrisch und funktionell zu den übrigen Skizzenelementen in Beziehung setzen. Somit kann bereits der Prozess des Skizzierens als Denkunterstützung genutzt werden, und nicht erst die Skizze als resultierendes Produkt. Bei dieser natürlichen Arbeitsweise besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Struktur der Gedanken des Entwerfenden und der Struktur seines Symbolsystems (s. auch Goel, 1995).

Mit CAD erstellte Bildschirmentwürfe besitzen dagegen zu jedem Zeitpunkt im Entwurfsprozess ein sehr vollendetes Aussehen. Ein Wechsel des Abstraktionsniveaus ist wegen der erforderlichen exakten Festlegung von Produktdefinitionen praktisch unmöglich. Die Eingabe von Text kann über die Tastatur erfolgen, allerdings müssen vorab entsprechende Funktionen angeklickt werden. Es ist unklar, inwieweit hierbei die Informationsrückkopplung während der Repräsentationserstellung eingeschränkt wird, und der Zwang zur exakten Produktdefinition die Möglichkeit zur Neuinterpretation der eigenen Festlegungen beschränkt.

4.3 Externalisierung

4.3.1 Einheit von Seh- und Handlungsraum

Die Verbindung von Wahrnehmung und Handlung ist als biologische Grundstruktur von entscheidender Bedeutung für das kognitive System (Stadler, Seeger & Raeithel, 1977; Hacker, 1998b). Bei der Hand-Auge-Koordination erfolgt im Laufe der Ontogenese eine Kopplung der Handlungs- und Wahrnehmungsfunktion, welche zum einen zielgerichtetes Handeln ermöglicht und zum anderen die Voraussetzung für die räumliche, kinetische und dynamische Bezugssystembildung in der Wahrnehmung darstellt. Die neurophysiologische Grundlage zielgerichteter Bewegungen sind permanente sensorische Afferenzen, die durch reafferente Meldungen ein absolutes Bezugssystem für den Körper bilden. Versuche mit Umkehrbrillen zeigen, dass die

visumotorische Koordination bei einer Störung dieser natürlichen Einheit gänzlich aufgehoben werden kann und drastische Folgen nach sich zieht.

Sowohl das Entwerfen mit Papier und Bleistift als auch mit Graphiktablett gewährleisten eine Einheit von Seh- und Handlungsraum: Der Entwerfende blickt auf den Bereich, in dem er händig tätig ist. Dadurch bildet das Freihandskizzieren eine Voraussetzung für das sog. Probehandeln als motorischer Komponente. Hierbei analysiert man Eigenschaften des konzipierten Systems, etwa durch die Simulation der Bewegungen von Elementen des Produkts mittels Stift. Beim Probehandeln im Sinne des Planens werden „einzelne Aktionen auf ihre Konsequenzen untersucht, Einzelaktionen probeweise zu Ketten zusammengefügt, um dann die Konsequenzen solcher Aktionsketten zu untersuchen. Man macht das nicht in der ´richtigen` Realität, sondern im Kopf, auf dem Papier oder mit dem Computer“ (Dörner, 1989, 235). Das Probehandeln ermöglicht die Berücksichtigung einer Vielzahl von Handlungsmöglichkeiten sowie deren freie Kombinier- und Generierbarkeit, die Reversibilität der Handlungsplanung, die Revidierbarkeit von bis dahin nur gedachten Lösungsschritten und ferner eine Effizienz des gedanklichen Hantierens, Erkundens und Experimentierens (vgl. Ueckert, 1989, 1995; s. auch Volpert, 1987; Gollwitzer, 1991).

Beim rechnergestützten Entwerfen ist diese Einheit von Seh- und Handlungsraum nicht gegeben. Die Maus als abstraktes Eingabemedium macht eine Koordination der Blickbewegungen des Auges auf dem Bildschirm mit der manuellen Steuerung des Cursors erforderlich. Diese zerschnittene, unnatürliche Bedienungsform erscheint gerade für die kreativen frühen Abschnitte des Entwerfens ungeeignet, da sie die Möglichkeiten des Probehandelns einschränkt. Zwar wird häufig versucht, durch ein Auf- und Abgleiten des Cursors mit Hilfe der Maus Bewegung zu simulieren und damit die Vorstellung zu unterstützen; im Vergleich zu den obengenannten Entwurfsbedingungen ergibt sich bei der Arbeit mit dem Rechner jedoch eine wesentliche Verminderung der sinnlich wahrnehmbaren Erfahrungsbasis.

4.3.2 Sensumotorische Übersetzung

Bewegungen werden gleichzeitig durch mehrere Systeme mit jeweils unterschiedlichen sensorischen Ausgangsdaten reguliert. So lenken bei der Arbeitstätigkeit „Entwerfen“ das taktilkinästhetische und das visuell vermittelte Regulationssystem kooperativ die vorherrschenden Handbewegungen (Hacker, 1998b; Volpert, 1969). Das Entwerfen durch Freihandskizzieren mit den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ erlaubt eine natürliche, linienzugbasierte Zeichnungserzeugung. Der Stift kann ohne das vorherige Betätigen von Funktionalitäten an jeder beliebigen Stelle an- und abgesetzt werden und es lassen sich rasch und

intuitiv sämtliche, vom Entwerfenden intendierten Formen erzeugen. Dabei ist ein Strich so lang, wie er mit dem Stift gezogen wird, so dass keine bleibenden psychomotorischen Lernerfordernisse existieren.

Im Vergleich dazu kann es bei der rechnergestützten Arbeit zu psychomotorischen Übersetzungsproblemen kommen: Das Erstellen von Entwürfen mit AutoCAD erfordert aufgrund der von Beginn an festzulegenden konkreten Abmessungen und Eigenschaften (s. Abschnitt 2.3.2) das Erlernen neuer Übersetzungsverhältnisse. Die Strichlänge hängt von der zu berücksichtigenden Mausübersetzung ab. Dadurch wird geistige Kapazität gebunden, die dem Nutzer zur Bearbeitung des eigentlichen Problems nicht mehr zur Verfügung steht (Hacker, 1995a).

Hinzu kommt, dass das zu jeder Zeit vorhandene Maßstabsproblem eventuell von den Entwerfenden in Abhängigkeit vom genutzten Arbeitsmittel als unterschiedlich transparent erlebt wird. Möglicherweise sind bei der Arbeit mit CAD aufgrund der erforderlichen sensumotorischen Übersetzung durch die Mausbedienung Maßangaben und deren Relationen schwerer überschaubar.

4.3.3 Taktil-kinästhetische Bewegungssteuerung

Die taktil-kinästhetische Bewegungssteuerung zeigt sich im Prozess der Externalisierung. Das Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ bedarf diesbezüglich keiner Einarbeitung durch den Nutzer, da dieser im Laufe jahrelanger Sozialisation durch die Kulturtechnik „Schreiben“ an dessen Gebrauch gewöhnt wurde.

Sowohl das Graphiktablett als auch der Rechner bedingen Veränderungen in der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung gegenüber Papier und Bleistift. Bei der Verwendung des Graphiktabletts wird ebenfalls mit einem Stift gearbeitet, die Oberfläche des Geräts verfügt jedoch über eine spezielle Beschichtung und erfordert durch den Anstellwinkel eine andere Handhaltung bei der Strichführung. Seine Drehbarkeit ist verglichen mit einem Blatt Papier eingeschränkt. Die Bedienung von Maus und Tastatur beim rechnergestützten Entwerfen ist diesbezüglich in keiner Weise mehr mit Papier und Bleistift vergleichbar.

4.3.4 Sensumotorik und visuelle Rückmeldung

Experimente zeigen, dass für visuelle und akustische Verlaufsrückmeldungen zeitliche Bedingungen erfüllt sein müssen, um die Abläufe der Bewegungsregulation nicht zu stören (Smith, Crary & Smith, 1960; Long, 1975; Held, Efstathiou & Green, 1966; Helm, 1965). Auch iterative Methoden zur Lösungsfindung beim Entwerfen sind auf eine sofortige Rückmeldung ange-

wiesen. Die Ergebnisse ausgeführter Kommandos, insbesondere die einer geometrischen Generierung oder Änderung, sollten für den Nutzer unmittelbar sichtbar sein (sog. *Sofortkontrolle* nach DIN EN ISO 9241-10, 1996). Dies ist beim Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift der Fall.
Bei der Nutzung des Graphiktabletts scheint eine eventuelle Verzögerung von der verwendeten Software abhängig zu sein. Durch eine flachere Displaytechnologie beim *Cintiq 15X* ließ sich der räumlich wirksam werdende Parallax-Effekt reduzieren, wodurch im Vergleich zum Vorgängermodell *PL-400* ein präziseres, detailgenaueres Arbeiten ermöglicht wird.
Beim Entwerfen mit AutoCAD besteht hingegen eine Verzögerungsproblematik zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung. Der Informationsverarbeitungsprozess wird - modifiziert durch die Dialogstruktur und die Ein- und Ausgabeprozeduren - auf Mensch und Maschine arbeitsteilig zerlegt. Durch die Ein- und Ausgabeprozeduren werden Zeitverzögerungen zwischen Absicht bzw. Entscheidung und Handlung sowie zwischen Befehl und Antwort erzeugt. Das Handlungsresultat wird nicht direkt zum Zeitpunkt der Handlung an sich sichtbar. Damit dennoch eine weitestgehend reibungslose Bearbeitung der Problemstellung mit dem Arbeitsmittel „AutoCAD“ gewährleistet ist, werden erhebliche psychomotorische Lernerfordernisse an den Nutzer gestellt.

Aus den aufgeführten Anforderungsunterschieden lassen sich hypothetisch Aussagen zur psychophysischen Beanspruchung des Entwerfenden einschließlich möglicher physiologischer Beeinträchtigungen und psychischer Einschränkungen des Wohlbefindens ableiten. Die Intensität der psychischen Belastung wird nach DIN 10075-2 (2000) unter anderem von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Bedienungsstrategien
- Geforderte Genauigkeit der Informationsverarbeitung
- Gleichzeitige Aufgabenbearbeitung
- Parallele vs. serielle Verarbeitung
- Zeitverzögerungen
- Mentale Modelle
- Beanspruchung des Arbeits- und Langzeitgedächtnisses
- Dimensionalität motorischer Aktivität.

Die Entlastung von Routinetätigkeiten bei der Arbeit mit CAD führt durch die Steigerung der Arbeitsmenge und den andauernden Entscheidungsdruck oftmals zur Leistungsverdichtung (Derisavi-Fard, Frieling & Hilbig, 1989; Bergmann, 1998; Volpert, 1988). Aufgrund der häufig

unangemessenen Funktionsteilung zwischen Mensch und Rechner und der damit verbundenen Überforderung der Wahrnehmungs- und Verarbeitungskapazität kommt es zu einer psychophysischen Zusatzbeanspruchung für den Entwerfenden, die in einen Leistungsabfall münden kann (Müller, 1986b).

Durch die hohen Anforderungen an das visuelle System bedingt das rechnergestützte Entwerfen möglicherweise Beschwerden im Augenbereich. In einigen Studien über gesundheitliche Beschwerden bei Computerarbeit berichten drei Viertel (Smith, Cohen, Stammerjohn & Happ, 1981; Sauter, Gotlieb, Roher & Dodson, 1983) bzw. über die Hälfte der Anwender (Smith, 1984) von Augenproblemen in Form von Ermüdung, Brennen, Rötungen, Flimmern etc.

Auch muskuloskelatale Beschwerden, wie z. B. Rücken-, Schulter- und Nacken- sowie Hand- und Handgelenksschmerzen, sind häufige Begleiterscheinungen an Arbeitsplätzen mit überwiegender Bildschirmarbeit (Ertel, 1994). Als Hauptursache wird die statische Sitz- und Blickhaltung angegeben, die bei der Arbeit am Rechner oft über Stunden eingenommen wird (Pope, Anderson, Frymoyer & Chaffin, 1991, zitiert nach Fitzgerald, 1992). Diese Belastung kann bei der Arbeit mit dem Graphiktablett durch den stufenlos regulierbaren Fuß umgangen werden. Dieses Gerät kann außerdem - vergleichbar mit einem Skizzenblock – auf dem Schoß gehalten werden. In einer Untersuchung von Derisavi-Fard, Frieling et al. (1990) gaben etwa 30 % der befragten Konstrukteure zumindest gelegentliche Beschwerden im Bereich des Kopfes und der Sinnesorgane sowie im Nacken- und Schulterbereich an; mehr als 5 % klagten hier über häufige Schmerzen. Die von Schmid (1995) befragten Informatiker klagten zu fast 70 % über gelegentliche oder regelmäßige Beschwerden im Kopf-, Nacken- sowie Rückenbereich. Schmerzen im Hand- und Handgelenksbereich wurden von 30 % angegeben.

Neben der Bewegungslosigkeit besteht gerade durch die Bedienung von Tastatur und Maus die Notwendigkeit schneller repetitiver Bewegungen, die längerfristig zu Bewegungseinschränkungen und zu Schmerzen in den oberen Gliedmaßen führen können (Repetition Strain Injury). Eine Untersuchung der Global Ergonomic Technologies (1998) zum Vergleich von Haltungen bei der Stift- vs. Mausnutzung hat bei der Bedienung des Rechners durch die Maus problematische Auswirkungen festgestellt: Es wurden sowohl eine übermäßige Pronation und Extension der Hand beobachtet als auch ulnare und radiale Abweichungen von der neutralen, entspannten Position.

Inwieweit beim Entwerfen durch Freihandskizzieren mit einem Graphiktablett eine psychophysische Zusatzbeanspruchung gegeben ist, soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchung geklärt werden.

4.4 Automatische Einbindung in den weiteren rechnergestützten Konstruktionsprozess

Heutzutage findet der Produktentwicklungsprozess nahezu vollständig auf digitale Weise statt. CAD-Systeme haben sich aufgrund ihrer Funktionalität ausnahmslos in den Konstruktionsabteilungen etabliert. Der Rechnereinsatz erfordert jedoch von Unternehmen hohe Investitionen, die nur dann zu rechtfertigen sind, wenn im gesamten Produktentwicklungsprozess eine vollständig integrierte Anwendung und Nutzung des Datenflusses erreicht werden. Es existieren Bestrebungen, die mit CAD erzeugten Daten so aufzubereiten, dass sie den Informationssystemen der anderen Funktionsbereiche CAP (Computer-Aided Production), CIM (Computer-Integrated Manufacturing), CAQ (Computer-Aided Quality Assurance), PPS (Produktionsplanung und -steuerung) unmittelbar zugänglich sind und nicht erst manuell interpretiert und umkodiert werden müssen (vgl. Pahl, 1990; Vajna et al., 1994). Davon verspricht man sich erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen.

Betrachtet man ausschließlich den Konstruktionsprozess, so lassen sich die in den frühen Entwurfsabschnitten mit CAD generierten Daten problemlos für die weitere gestalterische Festlegung und die Ausarbeitung des Entwurfs nutzen.

Aufgrund der bereits geschilderten hohen kognitiven Anforderungen der frühen Phasen an den Entwerfenden und deren hypothetisch defizitären Unterstützung durch CAD-Systeme, kommen hier häufig zusätzlich aufwandsarme Arbeitsmittel zum Einsatz. Die damit erzeugten Daten lassen sich jedoch zur Weiterverarbeitung nicht automatisch in den rechnergestützten Entwurfsprozess einbinden, sondern müssen manuell neu in den Rechner eingegeben werden. Neben den unvermeidbaren Zeitverzögerungen für die Neueingabe kann der Wechsel zwischen analogen und digitalen Arbeitsmitteln zu Fehlern und Informationsverlusten bei der Übertragung führen. Die Folge davon sind weitere Verlangsamungen des Entwurfsprozesses.

Mit dem Graphiktablett soll versucht werden, die Vorteile des Freihandskizzierens und des rechnergestützten Entwerfens zu kombinieren. Dazu ist eine entsprechende, im Abschnitt 2.3.3 angeführte Software notwendig, welche die durch Handskizzeneingabe bereitgestellten Daten automatisch in ein CAD-Programm überführt und ein flexibles Wechseln zwischen den verschiedenen Abstraktionsebenen gestattet. Die mit Hilfe des Skizzierens entwickelten Denkergebnisse ließen sich somit ohne zeitlichen und kognitiven Mehraufwand sofort als CAD-Bild darstellen und weiterbearbeiten. Eine derartige Software befindet sich für den Bereich der Konstruktion zur Zeit noch in der Entwicklungsphase. Eventuell lassen sich die entsprechenden Funktionalitäten aus bereits erfolgreich genutzten Programmen im Designbereich extrahieren (s. Abschnitt 2.3.3).

Die Tabelle 1 fasst die genannten Aspekte überblicksartig zusammen: Sie zeigt in der linken Spalte die hypothetischen Charakteristiken optimaler Unterstützungsmittel, die den beim Entwerfen zu unterstützenden Problembereichen zugeordnet sind. Rechts ist deren Erfüllung durch die einzelnen Arbeitsmittel ablesbar. Die Angaben basieren auf den im Teilkapitel 2.3 diskutierten, hypothetischen Anforderungen dieser verschiedenartigen Arbeitsmittel an den Nutzer.

Tab. 1: Hypothetische Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten der drei Arbeitsmittel bei einem Einsatz in den frühen Entwurfsphasen

Hypothetische Charakteristiken optimaler Unterstützungsmittel der frühen Entwurfsphasen	**Papier & Bleistift**	**Graphiktablett**	**2D-CAD**
<u>Arbeitsgedächtnis</u>			
• Geringes Okkupieren mentaler Kapazität für Arbeitsmittelnutzung	+	+	–
<u>Mentale Problemrepräsentation</u>			
• Kompatibilität von mentalen Repräsentationen und Bedienoperationen	+	+	–
• Wechsel des Abstraktionsgrades und der Modalität der Darstellung ohne Zusatzaufwand möglich	+	+	–
<u>Externalisierung</u>			
• Einheit von Seh- und Handlungsraum gegeben	+	+	–
• Keine sensumotorische Übersetzung erforderlich	+	+	–
• Keine Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung gegenüber Papier	+	+ ?	–
• Keine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung	+	+ /– (je nach Software)	–
⇒ Keine psychophysische Zusatzbeanspruchung	+	+ ?	–
Möglichkeit der automatischen Einbindung von (Teil-) Ergebnissen in den weiteren rechnergestützten Konstruktionsprozess	–	+ ?	+

+ : gegeben/ja; – : nicht gegeben/nein

5 Ein Bewertungskonzept für den Einsatz der verschiedenartigen Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsphasen

In dieser Arbeit soll das Unterstützungspotential der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift", „Graphiktablett" und „AutoCAD" in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens auf der Grundlage ihrer psychologischen Anforderungen an den Nutzer bewertet werden. Für solche Zielstellungen werden in der Evaluationsforschung Mehr-Ebenen-Ansätze empfohlen (z. B. Kirkpatrick, 1959, 1976; Stufflebeam, 1972; Warr, Bird & Rackham, 1978; für einen Überblick s. Bergmann, 1999). Das Vier-Ebenen-Modell von Kirkpatrick (1959, 1967, 1976) betrachtet neben den Ebenen der Reaktionen, des Lernens und des Verhaltens auch den monetären Nutzen einer Maßnahme in Form von Kennziffern wie Produktivitätssteigerungen oder die Erhöhung der Profitrate (Bergmann, 1999).

In Anlehnung an die Mehr-Ebenen-Ansätze erfolgt in dieser Arbeit eine mehrdimensionale, auf den Einsatz in den frühen Phasen bezogene Bewertung der verschiedenen Arbeitsmittel. Die Darstellung erfolgt nach der Wichtigkeit der einzelnen Bereiche: Entsprechend der thematischen Gütezentriertheit wird zunächst der Bereich der Ergebnisse behandelt. Ergänzt wird diese Bewertungsperspektive durch das Erleben der Probanden sowie eine detaillierte Analyse des Entwurfsprozesses, welche im Vergleich zu bisherigen Studien vertieft und erweitert werden soll.

Da in der vorliegenden Arbeit die vierte Ebene nicht konkret analysiert wird, soll im weiteren anstelle des Begriffs der Ebene der Begriff „Bereich" verwendet werden. Die entsprechenden Variablen werden im folgenden erläutert und begründet. Ihre Auswahl stützt sich dabei sowohl auf Erkenntnisse aus der Stress- als auch der Expertiseforschung und der Psychologie des Problemlösens.

5.1 Bewertung im Bereich der Ergebnisse

In der Expertiseforschung stellen die Lösungsgüte und die Bearbeitungszeit klassische Kriterien dar (z. B. Sonnentag, 1996; Hacker, 1996a). Da die Qualität der erzeugten Entwurfslösung und die dafür benötigte Zeit aus wirtschaftlichen Gründen in der konstruktiven Praxis als zentrale Aspekte gelten, werden sie auch bei der Bewertung von Entwurfstätigkeiten im Rahmen empirischer Untersuchungen genutzt (z. B. Dylla, 1990; Fricke, 1993; Rückert, 1997; Sachse, 2001; Römer, 2002). Ergänzt werden sie in der vorliegenden Untersuchung durch das beispielsweise in der Wissenschaftstheorie etablierte Kriterium der Kommunizierbarkeit des Resultats einer

geistigen Tätigkeit (Westhoff & Kluck, 1994; Knoegen & Sondergeld, 1985). Als Ergebnisvariablen erfasst wurden

- die Lösungsgüte,
- die Bearbeitungszeit sowie
- die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts.

5.1.1 Lösungsgüte

Der Erfolg des Konstruierens wird neben dem Zeitaufwand wesentlich durch die Güte des Entwurfsergebnisses bestimmt. Für die meisten Entwurfsprobleme existiert eine Vielzahl zufriedenstellender Lösungen und keine klar beste Lösung (Ullman, 1997). Besonderes Interesse gilt in dieser Untersuchung der Frage, welchen Einfluss die Nutzung verschiedenartiger Arbeitsmittel bei der Lösungserarbeitung auf die Lösungsgüte in Form der technischen Wertigkeit ausübt.
Aussagen über die Qualität einer Lösung beschreiben in der Produktentwicklung die Eignung eines technischen Gebildes bezüglich einer vorher definierten Zielstellung. Rittel & Musso (1992) weisen darauf hin, dass die Güte eingeschätzt und bestimmt, aber nicht „objektiv“ ermittelt werden kann, weil sie nicht absolut existiert: „Eine Aussage über die Güte eines Objekts ist ein Urteil; das Bewertungssystem von jemandem ist eine Darstellung seiner Art und Weise, zu einem Urteil oder einer Bewertung zu kommen“ (Rittel et al., 1992, 93). Dabei hängt die Beurteilbarkeit von Konzepten stark von der dargestellten Lösungstiefe ab. Die Wahrscheinlichkeit, dass Abschätzungen hinsichtlich zu erwartender Produktmerkmale zutreffend sind, steigt mit dem Konkretisierungsgrad und der Detailtiefe eines Lösungskonzepts sowie mit der handwerklichen Qualität der Darstellung.
Die Bewertungskriterien in der Konstruktion basieren zumeist auf drei generellen Zielsetzungen (Kesselring, 1951; Ehrlenspiel, 1995; Pahl & Beitz, 1997):

- Erfüllung der technischen Funktion (technische Bewertung; s. VDI 2225, 1997)
- wirtschaftliche Realisierung (wirtschaftliche Bewertung; s. VDI 2225, 1997)
- Sicherheit für Mensch und Umgebung (sicherheitliche Bewertung; s. VDI 2244, 1988).

Bei der rein wirtschaftlichen Bewertung wird nach Kesselring (1951) ausschließlich die Größe des Aufwands für die Herstellung des Objekts in Form der Herstellkosten berücksichtigt. Wirtschaftliche Vorteile, die sich z. B. durch eine höhere Lebensdauer oder eine geringere Wartungsnotwendigkeit ergeben, werden bei der technischen Bewertung erfasst, so dass die technische und wirtschaftliche Bewertung eng miteinander verknüpft sind.

5.1.2 Bearbeitungszeit

Bei der differenzierten Betrachtung des Unterstützungspotentials der verschiedenen Arbeitsmittel ist die zum Lösen der konstruktiven Problemstellung benötigte Zeit von entscheidender Bedeutung. Erst das in einer bestimmten Zeiteinheit erzielte Entwurfsergebnis lässt Aussagen über die Stärke der Unterstützung des dabei genutzten Arbeitsmittels zu. Man kann davon ausgehen, dass Arbeitsmittel, die in den frühen Entwurfsphasen für den Nutzer unterstützend wirken, die Lösungsfindung beschleunigen und damit die Bearbeitungszeit verkürzen.

5.1.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Angesichts der zunehmenden Veränderungsgeschwindigkeit und Komplexität in der Produktentwicklung gewinnen vor allem in deren frühen Phasen kooperative Prozesse vermehrt an Bedeutung (Goldschmidt, 1996; Dwarakanath & Blessing, 1996; Minnemann, 1991; Ullman, 1997). Eine empirische Untersuchung ergab, dass in einem Konstruktionsprozess benötigte Informationen zu 90 % durch direkte zwischenmenschliche Kommunikation ausgetauscht werden, obwohl man versucht, diese schriftlich und rechnergestützt zur Verfügung zu stellen (Wallace, 1997). Das Simultaneous Engineering z. B. sieht eine frühzeitige Einbeziehung aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Unternehmensbereiche vor, um die Zeitspanne zwischen Produktplanung und Markteinführung zu reduzieren und eine ganzheitliche Produktoptimierung zu erleichtern. Die notwendige Verbesserung des Informationsflusses bezieht sich sowohl auf die Zusammenarbeit zwischen Konstrukteuren als auch zwischen Konstrukteuren und Personen anderer Abteilungen (z. B. aus der Fertigung oder dem Produktmarketing), ausgelagerter Unternehmensbereiche und dem Auftraggeber (Grabowski & Geiger, 1997).

Für ein gemeinsames Problemverständnis ist es notwendig und entscheidend, dass in der Teamarbeit Konzeptvarianten und Ideen kommuniziert werden (Cross & Cross, 1996). Eine Kommunikationsgrundlage bieten in diesen Phasen Visualisierungen bestimmter Objekte mit ihren Elementen und Eigenschaften in Form von Handskizzen, Zeichnungen und rechnergestützten Entwürfen (Henderson, 1991, 1995, 1999; Bucciarelli, 1994; Vincenti, 1990). Diese werden im Rahmen der Produktentwicklung neben ihrer Funktion als Denkmittel zielgerichtet als Kommunikationsmittel im Sinne einer Übertragung von Informationen verwendet (Kranke, 1987; Uhlmann, 2000; Stacey & Eckert, 2000; Eckert, 2001; Eckert, Clarkson & Stacey, 2001; Tang & Gero, 2001). Die Sprache eignet sich hierzu weniger, dem auditiven Übertragungskanal kommt eher eine unterstützende Bedeutung zu (Kranke, 1987).

Handskizzen bestehen in der Regel aus sog. „dense symbols“ (Stacey & Eckert, 2000, 13; vgl. auch Goel, 1995), deren Bedeutung durch die Kombination symbolischer und geometrischer

Inhalte in Übereinstimmung mit dem vom Betrachter vermuteten Referenzobjekt bestimmt wird. Sie besitzen – kombiniert mit dem Fachwissen des Ingenieurs – eine hohe Informationsdichte: Aus der Skizze erschließen sich dem Fachmann nahezu alle (erwünschten und unerwünschten) Eigenschaften des technischen Gebildes.

Die Bewertung der Lösungsgüte und der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts sind insofern eng miteinander verknüpft, dass nur eine Lösung, die soviel Informationsgehalt besitzt, dass sie als Lösung anerkannt ist, auf ihre Kommunizierbarkeit hin überprüft werden kann. Die Bestimmung eines Werts für die Lösungsgüte setzt also einen Mindestinformationsgehalt voraus. Dazu müssen die syntaktischen Elemente in ihren Beziehungen bestimmten Anforderungen genügen. Die Zeichnung stellt eine übergeordnete, international verständliche „Sprache“ dar; um ihre Eindeutigkeit zu gewährleisten, muss sie nach verbindlichen, universellen Zeichenregeln (z. B. DIN oder ISO) angefertigt werden (Kuttig, 1993; Ferguson, 1993; Lippardt, 2000; von der Weth, 2001). Die Bedeutung von Symbolen und Zeichen muss dabei klar und eindeutig definiert sein, damit diese von verschiedenen Betrachtern gleich interpretiert und verstanden werden (Hubka, 1983). Es sollte Ziel sein, den Verlust an Informationen und etwaige Verfälschungen auf dem Weg vom Sender über die sensumotorische Umsetzung mit Hilfe eines bestimmten Arbeitsmittels hin zur kognitiven Verarbeitung durch den Empfänger möglichst gering zu halten. Der Kommunikationspartner soll durch die Betrachtung des ihm gereichten Entwurfs den vom Entwerfenden beabsichtigten, sich auf die technische Lösung beziehenden Informationsgehalt eindeutig verstehen (Tjalve et al., 1975; Stacey et al., 2000).

Gerade bei mittels AutoCAD als zweidimensionalem Zeichenprogramm produzierten Entwürfen setzt die Normung der verwendeten Informationsträger wie etwa Linien und Ikons häufig die Beherrschung einer fachspezifischen „Sprache“ voraus. Derartige Informationen sind nur verständlich, wenn der Empfänger den Kode zu ihrer Entschlüsselung kennt: Graphische Repräsentationen bedeuten für Personen mit verschiedenartiger Expertise Unterschiedliches (Henderson, 1999; Eckert & Stacey, 2001). Technische Experten sind im Vergleich zu Fachfremden in der Lage, derartige Darstellungen richtig zu dekodieren; sie stellen jedoch andererseits auch höhere Forderungen an den Informationsgehalt der Darstellung. Mittels bildlicher Repräsentationen unterstützte kommunikative Prozesse zwischen Experten sowie zwischen Konstrukteuren und technischen Laien müssen folglich getrennt betrachtet werden.

5.2 Bewertung im Bereich des Erlebens

Die subjektive Wahrnehmung der Problemstellung, ihrer Bearbeitung und des erzeugten Ergebnisses durch den Bearbeiter selbst liefert bei einem gezielten Vergleich der verschiedenartigen Arbeitsmittel wichtige Aussagen aus der Sicht des handelnden Individuums. Zusammen mit der Motivation der Probanden stellt sie eine wesentliche Möglichkeit dar, die beobachteten Ergebnisse und Prozesse zu interpretieren. In der vorliegenden Arbeit wurden in diesem Kontext Informationen zur

- erlebten Problemschwierigkeit,
- Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit sowie zur
- psychischen Beanspruchung erhoben.

5.2.1 Erlebte Problemschwierigkeit

Die nachträgliche Beurteilung der Problemschwierigkeit durch den Probanden steht im Bezug zum verwendeten Arbeitsmittel. Je stärker das Unterstützungspotential des Arbeitsmittels, desto weniger schwierig sollte die Problemstellung von der Versuchsperson empfunden worden sein. Ferner wird eine Beziehung zur psychischen Beanspruchung angenommen: Es kann davon ausgegangen werden, dass ein als schwierig erlebtes Entwurfsproblem vergleichsweise hohe Anforderungen an den Entwerfenden gestellt und damit auch die psychische Beanspruchung entsprechend beeinflusst hat.

5.2.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit

Auch die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit erlaubt Aussagen über das Unterstützungspotential des zur Lösungserarbeitung genutzten Arbeitsmittels. Ein Arbeitsmittel, das die frühen Entwurfsabschnitte stark unterstützt und deshalb eine tiefgehende Analyse und Beschäftigung mit dem Entwurfsproblem gestattet, erhöht die Sicherheit des Entwerfenden, dass die von ihm gewählte Lösung technisch richtig ist und den gestellten Anforderungen entspricht.

5.2.3 Psychische Beanspruchung

Die Beanspruchung beschreibt die Auswirkungen der Belastung auf eine Person in Abhängigkeit von ihren individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten als interne Reaktion (Rohmert, 1984; DIN EN ISO 10075/Teil 1-3, 2000 und 2002; Richter, o. J.; Bullinger, 1994). Plath & Richter (1984) weisen darauf hin, dass die entstehenden Beanspruchungsfolgen je nach

Art, Höhe und Umfang der Belastung sowohl fördernder als auch beeinträchtigender Art sein können.

Durch den Einsatz neuer Informationstechniken im Entwicklungsbereich sind einige bislang dem Menschen zugeordnete (Routine-)Tätigkeiten dem Rechner übertragen worden, woraus sich eine Entlastung des Menschen ableiten lässt. Die in der Folge dieser Veränderungen notwendige hochkonzentrierte Bildschirmarbeit und die zur Benutzung eines CAD-Systems erforderlichen Kenntnisse über die Struktur und Syntax eines Befehlsvorrats und die Handhabung verschiedener Systemkomponenten haben allerdings eine Anforderungsverschiebung von primär physischen hin zu psychisch-kognitiven und psychisch-affektiven Belastungen für den Konstrukteur zur Folge (Heinrich, 1987; Langner, Müller & Springer, 1990; Kleinbeck, 1992).

5.3 Bewertung im Bereich des Prozesses

Im Kapitel 4 wurden aus handlungstheoretischer Perspektive hypothetische Unterschiede in den sensumotorischen und kognitiven Anforderungen herausgestellt, die mit der Nutzung der verschiedenartigen Arbeitsmittel verbunden sind. Eine Beurteilung des Unterstützungspotentials der betrachteten Arbeitsmittel kann also nicht allein durch die Feststellung des Grades der Zielerreichung im Sinne der Ergebniskriterien erfolgen. Es ist darüber hinaus die Frage zu beantworten, welche Anforderungen der verschiedenen Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsabschnitten unterstützend oder behindernd wirken. Dazu ist es notwendig, den Prozess der Tätigkeit von der Anforderungsklärung bis zum technischen Entwurf näher zu betrachten.

Zur Analyse von Denkprozessen werden in der Expertiseforschung sehr unterschiedliche Wege diskutiert (zum Überblick z. B. Hacker, 1992). Von besonderer Bedeutung erscheint im Hinblick auf die Zielstellungen der vorliegenden Arbeit das Konzept der leistungsbestimmenden Teiltätigkeiten sowie der optimalen Handlungsfolgen (vgl. Hacker, 1992). Ausgehend von den Problemen des handlungsbegleitenden bzw. nachträglichen lauten Denkens als einem Zugang zu Denkprozessen im Handlungsverlauf wurde in einer Vielzahl von Arbeiten aus der Dresdener Psychologie bereits in den 60iger Jahren die Untersuchung von Denkprozessen durch die Analyse des äußeren Handlungsverlaufs realisiert (z. B. Görner, 1968; Görner, Höhne & Müller, 1972; Skell, 1972). Ausgangspunkt der Überlegungen war, dass sich Denkoperationen unmittelbar in Handlungsphasen manifestieren und Denkprozesse zumindest teilweise in diesen ablesbar werden (Klix, Neumann, Seeber & Sydow, 1963; Klix & Lander, 1967; Rubinstein, 1958, 1961). Zwei Herangehensweisen werden vorgeschlagen (Skell, 1972):

- die Analyse kleiner Teileinheiten des Handlungsverlaufs als Zugang zu unmittelbar handlungsleitenden Kognitionen und

• die Analyse von Strategien durch die zusammenfassende Betrachtung mehrerer solcher Teileinheiten.

5.3.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Den während des Entwurfsprozesses ausgeführten Handlungen kommt eine bedeutende Rolle zu, obwohl sie bis auf das Skizzieren bzw. Zeichnen und das Notieren nicht in speziellen Produkten wie etwa Skizzen oder Text resultieren. Man ging davon aus, dass ein tätigkeitsbasiertes Modell, welches das Verhalten des Bearbeiters zur Grundlage hat, eine umfassende Zergliederung und Darstellung des Entwurfsprozesses im Hinblick auf Übereinstimmungen zwischen diesen Teiltätigkeiten und den kognitiven Äquivalenten der visuellen und verbalen Daten ermöglicht. Das Skizzieren bzw. Zeichnen gehört z. B. zur visuell-bildhaften Kategorie, wohingegen das Notieren und das Sprechen klar der verbalen Modalität entsprechen. Die Teiltätigkeiten „Aufgabenstudium“, „Betrachten“ und „keine sichtbare Aktivität“ können entweder bildhafter oder verbaler Natur sein, je nachdem womit sich der Proband zu welchem Ausmaß beschäftigt.

5.3.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Eine detaillierte Untersuchung des konstruktiven Entwurfsprozesses in Abhängigkeit vom Arbeitsmittel erfordert neben der Betrachtung der äußeren, sichtbaren Handlungen im Sinne von Teiltätigkeiten eine fundierte Analyse der Vorgehensweise in Form sämtlicher getätigter Schritte bis zur Fertigstellung der Lösung. Erst dadurch lassen sich auf quasi mikroskopischer Ebene Aussagen zu den Denkinhalten und -verläufen des Entwerfenden unter Nutzung der verschiedenartigen Arbeitsmittel gewinnen.

Ein erster nachvollziehbarer Ansatz findet sich bei Sachse, Leinert & Hacker (2001b); dieser bezieht sich jedoch eher auf den Bereich des Problemlösens im allgemeinen und betrachtet nicht den Skizzierprozess an sich, sondern eine am Computer zu realisierende Problemlösung bezüglich der Schrittanzahl.

5.3.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Der Bearbeiter einer konstruktiven Problemstellung steht sowohl zu Beginn als auch während des Entwurfsprozesses ständig vor der Entscheidung, entweder durch die Generierung eines möglichst breiten Feldes von Lösungsalternativen etwas prinzipiell Neues zu entwickeln oder

einen möglichst großen Teil der Gestalt und Eigenschaften des Vorgängers beizubehalten und die bisherige Lösung zu verbessern (Giapoulis, Schlüter, Ehrlenspiel & Günther, 1995).
Dylla (1990) unterscheidet zwischen generierendem und korrigierendem Vorgehen. Generierend vorgehende Probanden erzeugen zunächst mehrere, voneinander unabhängige, gleichberechtigte Lösungsalternativen, um nach anschließender Bewertung die Variante der Wahl weiterzuverfolgen. Untersuchungsteilnehmer mit einer korrigierenden Vorgehensweise ändern die erste prinzipielle, als unzureichend erkannte Lösungsidee solange ab, bis sie die geforderten Eigenschaften erfüllt oder sie suchen bei erkannter mangelnder Eignung nach einer neuen. D. h., es werden nicht gleichzeitig verschiedene Varianten in Betracht gezogen, sondern durch das Verwerfen der zuvor favorisierten Lösung nacheinander eröffnet.
Die prozessorientierte Lösungserstellung, vor allem die Lösungsvariation, gilt als besonderes Merkmal des taktischen Vorgehens bei der Lösungssuche (Fricke, 1993), die sich als ständiges Wechselspiel zwischen Erweiterung und Einengung des betreffenden Suchraums gestaltet (Dörner, 1989). Aus konstruktionsmethodischer Sicht wird die Wahrscheinlichkeit, eine geeignete Lösung zu finden und ein qualitativ hochwertiges Endergebnis zu erreichen, durch das Generieren und Bewerten von Lösungsalternativen bereits in den frühen abstrakten Entwurfsphasen erhöht. Nach Ehrlenspiel (1994) erscheint es sinnvoll, beim Konzipieren die generierende Lösungserzeugung vorzuziehen, da sie eher zu neuen und interessanten Lösungen führt. Im Gegensatz zur korrigierenden Vorgehensweise erfordert sie jedoch mehr Erzeugungsaufwand. Die höhere Komplexität und das längere Ausharren in einer ungewissen Lösungssituation gehen zudem mit einer größeren mentalen Belastung einher. Beim Gestalten hingegen empfiehlt sich der Einsatz der korrigierenden Lösungserzeugung, da sie eine tiefergehende Analyse und eine einfachere Kompatibilitätsprüfung ermöglicht.

6 Orientierende Befragungsstudie: Nutzung und Erfahrungen im Umgang mit verschiedenen Arbeitsmitteln in den frühen Entwurfsphasen

6.1 Ziel- und Fragestellungen

Um einen tiefergehenden Überblick über unterschiedliche, in den frühen Entwurfsphasen eingesetzte Arbeitsmittel zu gewinnen, wurde zunächst eine schriftliche Befragung bei einer Stichprobe der für die experimentelle Hauptuntersuchung angezielten studentischen Population durchgeführt. Zwar ließen die universitären Ausbildungsinhalte Schlussfolgerungen hinsichtlich der Lehrmeinung über den Einsatz von Arbeitsmitteln beim Entwerfen zu; dennoch wollte man vor der Durchführung einer experimentellen Untersuchung systematisch zu einer umfassenderen Erkenntnisgrundlage gelangen.

Dabei interessierten folgende Fragestellungen:

- Welche Arten von Arbeitsmitteln werden wie häufig genutzt?
- Wie gehen Studierende beim Entwerfen vor und was sind dabei auftretende Schwierigkeiten?
- Welche Funktionen erfüllen nicht-digitale versus digitale Arbeitsmittel?
- Welche Auswirkungen haben diese auf die Effizienz und Qualität des Entwurfsprozesses?
- Welche Erfahrungen haben Studierende mit der kombinierten Nutzung von Skizzen und CAD?

6.2 Stichprobe

Bei den Befragten handelte es sich um Studierende der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, die zum Befragungszeitpunkt das Vordiplom in einem der relevanten Studiengänge abgeschlossen hatten und regelmäßig konstruierten. Sie verteilten sich über die Semester 5 bis 15. Von den ursprünglich 85 in Veranstaltungen angesprochenen Probanden beteiligten sich 61 mit einem vollständig ausgefüllten Fragebogen an der Erhebung. Das durchschnittliche Alter der 57 männlichen und 4 weiblichen Teilnehmer betrug 24 Jahre (SD = 3.43). Zum Zeitpunkt der Befragung arbeiteten sie bereits durchschnittlich 3,5 Jahre mit CAD (SD = 1.43).

6.3 Methodik

Der Fragebogen war nach dem „Trichterprinzip“ gestaltet: Nach einleitenden Fragen zum Einsatz von Arbeitsmitteln und zum üblichen Vorgehen in den frühen Entwurfsphasen folgten Fragen zur Nutzung spezieller Arbeitsmittel und zur Erfahrung damit. Nach den eingangs erfassten demographischen und qualifikationsbezogenen Daten gliederte er sich in vier Bereiche und enthielt Fragen

- zu den verwendeten Unterstützungsformen, zur allgemeinen Vorgehensweise und zu aufgetretenen Schwierigkeiten in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens,
- zum Gebrauch von Skizzen beim Klären der Anforderungen und beim Entwickeln von Lösungskonzepten,
- zum Gebrauch von CAD beim Klären der Anforderungen und beim Entwickeln von Lösungskonzepten und
- zur kombinierten Nutzung von CAD und Skizzen im Entwurfsprozess.

Der verwendete Fragebogen war angelehnt an einen im DFG-Projekt „Aufwandsarmes Modellieren in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses“ (Ha 2249/9-1,2) entwickelten Fragebogen (vgl. Römer, 2002). Er bestand aus insgesamt 40 mehrheitlich geschlossenen Fragen mit vorgegebenem Antwortformat. In der Regel waren Mehrfachnennungen möglich. Die Originalfassung findet sich im Anhang A1.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Verwendete Unterstützungsformen und allgemeines Vorgehen in den frühen Entwurfsphasen

Nahezu alle Studierenden nutzen vorrangig mittels Papier und Bleistift erstellte Freihandskizzen beim Klären der Anforderungen und beim Entwickeln von Lösungskonzepten (vgl. Tabelle 2). Maßhaltige Skizzen werden hierzu hingegen von weniger als einem Viertel eingesetzt.

Etwa die Hälfte der Befragten arbeitet bereits in den frühen Entwurfsphasen unter anderem rechnergestützt mit 2D-CAD, knapp ein Viertel mit 3D-CAD.

Ein Großteil der Studierenden bedient sich auch einfacher, gegenständlicher Modelle, bei denen die Materialien und Abmessungen nicht oder nur teilweise von Bedeutung sind. Komplexen Modellen mit produktähnlichen Eigenschaften kommt eine untergeordnete Rolle zu.

Tab. 2: Unterstützungsformen in den frühen Entwurfsphasen (N = 61; Befragungsstudie)

Unterstützungsform	**Häufigkeit der Nennung** (in %) (Mehrfachnennung möglich)
Freihandskizzen	97
Maßhaltige Skizzen	23
2D-CAD	49
3D-CAD	23
Einfache Modelle	79
Komplexe Modelle	15

Die Studierenden wurden weiterhin nach ihrer üblichen Vorgehensweise in den frühen Entwurfsabschnitten gefragt. Bezogen auf die Anforderungsklärung zeigte sich folgendes Ergebnis:

- 71 % der Befragten starten erst nach einer vollständigen Klärung der Anforderungen mit dem Entwickeln von Lösungskonzepten;
- 29 % beginnen früh, Lösungsideen zu entwickeln und leiten daraus die Anforderungen an das Produkt ab.

Das Klären der Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt erfolgt dabei neben der Analyse von Dokumenten zu vorhandenen bzw. Fremdprodukten (61 bzw. 54 %) hauptsächlich durch Skizzen und Modelle (84 %) und durch Gespräche mit Kommilitonen und Dozenten (69 %). Die identifizierten Anforderungen werden in der Mehrheit durch Skizzen (87 %) oder schriftlich in Form von Listen (75 %) festgehalten; 44 % der Studierenden halten sie unter anderem gedanklich fest. Graphische Darstellungen in Form von Diagrammen sowie Modelle finden zu diesem Zweck bei der befragten Stichprobe seltener Verwendung (12 bzw. 5 %).

Im Hinblick auf das Entwickeln von Lösungskonzepten gehen die teilnehmenden Studenten im allgemeinen wie folgt vor:

- 69 % generieren mehrere unterschiedliche Lösungsvarianten, um anschließend eine auszuwählen (generierendes Vorgehen);
- 31 % erarbeiten nur eine Lösung und modifizieren diese entsprechend (korrigierendes Vorgehen).

Die Konzeptentwicklung erfolgt in der Regel alleine (41 %) oder zu etwa gleichen Teilen durch Einzel- und Gruppentätigkeit (51 %).

Ferner sollten durch die Befragung bei den Studierenden in den frühen Phasen schon häufiger aufgetretene Schwierigkeiten ermittelt werden (vgl. Tabelle 3). Bezogen auf die Anforderungsklärung wurden am häufigsten Probleme im Zusammenhang mit der Überschaubarkeit der Anforderungen in ihrer Gesamtheit genannt: Mehr als die Hälfte der Studierenden berichtete von Anforderungen, die schwer zu überschauen bzw. zu umfangreich waren, um ständig geistig präsent zu sein. Anforderungen, die nicht offensichtlich waren, wurden häufig zu spät erkennbar. Als weiterhin problematisch erwiesen sich schwer zugängliche Informationen über bisherige Produkte etwa in Form von Zeichnungen und Modellen sowie die mangelnde Erkennbarkeit der Wichtigkeit einzelner Anforderungen.

Beim Entwickeln von Lösungskonzepten galten der Aufbau mentaler Repräsentationen von komplizierten räumlichen Strukturen oder Bewegungsabläufen sowie das Festhalten an einer Lösung, deren Untauglichkeit bereits abschätzbar gewesen wäre, als Schwierigkeiten. Auch der Sachverhalt, dass komplexe Zusammenhänge nicht ausreichend überblickt wurden, und die mangelnde Analyse und Tauglichkeitsbewertung einer Lösung wirkten sich bei mindestens einem Drittel der Befragten problematisch aus.

Tab. 3: Schwierigkeiten bei der Anforderungsklärung und der Konzeptentwicklung (N = 61; Befragungsstudie)

Anforderungsklärung	**Häufigkeit der Nennung** (in %) (Mehrfachnennung möglich)
Gesamtheit der Anforderungen zu umfangreich	56
Anforderungen zu spät erkannt	51
Informationen über bisherige Produkte schwer zugänglich	41
Wichtigkeit einzelner Anforderungen nicht erkennbar	30
Konzeptentwicklung	
Betrachten komplizierter Zusammenhänge vor dem „geistigen Auge“	59
Festhalten an einer untauglichen Lösung	56
Nicht ausreichendes Überblicken von Zusammenhängen	43
Mangelnde Analyse einer Lösung	33

6.4.2 Skizzen und CAD in den frühen Entwurfsphasen und deren kombinierte Nutzung

Die Studierenden wurden befragt, wie häufig sie Freihandskizzen und CAD bei der Anforderungsklärung und bei der Entwicklung von Lösungskonzepten einsetzen. 93 % der 61 Befragten nutzen in diesen Phasen immer oder häufig Freihandskizzen.

CAD findet weniger Verwendung: 47 % der teilnehmenden Studierenden arbeiten in diesen Entwurfsabschnitten nie oder selten rechnergestützt. Zur geometrischen Ausarbeitung des Konzepts kommt CAD hingegen bei 77 % der Befragten häufig oder immer zum Einsatz, bei der Ausarbeitung der fertigungsspezifischen Details sind dies sogar 93 %.
Bezogen auf die kombinierte Nutzung von Skizzen und CAD im Entwurfsprozess erbrachte die Befragung folgende Ergebnisse: Über zwei Drittel der befragten Studierenden (69 %) fertigen häufig oder immer eigens zur Vorbereitung der Arbeit mit CAD Skizzen an. Dabei werden mehrheitlich

- grundsätzliche Lösungsideen festgehalten (80 %),
- (Teil-)Konzepte geometrisch festgelegt (82 %) oder
- als 2D-Skizze geometrisch detailliert (62 %).

Drei Viertel (75 %) skizzieren mindestens hin und wieder während der Arbeit mit CAD; dazu nutzen 65 % zumindest hin und wieder einen aktuellen Ausdruck des CAD-Modells.

Nahezu alle befragten Studierenden sind völlig oder überwiegend überzeugt, dass sie durch das Skizzieren bessere Lösungskonzepte entwickeln (93 %) und schneller zu einer ausreichend guten Lösung gelangen (97 %). Dagegen sind etwa zwei Drittel der Befragten (62 %) der Meinung, mit der Hilfe von CAD keine besseren Lösungskonzepte zu entwickeln; 44 % sind nicht, 25 % nur teilweise der Meinung, mit CAD schneller zu einer Lösung zu gelangen.

Zwei Drittel der Befragten (66 %) nutzen vorrangig 2D-CAD; sowohl im 2D- als auch im 3D-CAD-Bereich findet überwiegend das System AutoCAD Verwendung.
Den lediglich für die Bedienung eines 2D-CAD-Systems notwendigen Aufwand schätzen 85 % der Studierenden als mittelmäßig oder hoch ein. Dabei können zwei Drittel (66 %) manchmal bis sehr oft Festlegungen nicht ihren Vorstellungen entsprechend umsetzen. Nur 16 % stellen mit Hilfe der vorhandenen Funktionalitäten des CAD-Systems auch Festlegungen dar, die nicht der Geometrie von Bauteilen entsprechen. Hier handelt es sich zumeist um Pfeile zur Andeutung von Bewegungsrichtungen und Freiformlinien, die über Splines realisiert werden.
Die intuitive Bedienbarkeit des genutzten CAD-Systems wird mehrheitlich als mittelmäßig bis sehr gering bewertet (insgesamt 90 %).
Ergonomische Probleme sind einem Drittel (33 %) der Befragten bei der Arbeit mit CAD bekannt. Diese haben körperliche und geistige Ermüdungserscheinungen in Form von

- Schulter- und Nackenschmerzen,
- Kopf- und Rückenschmerzen,
- Augenflimmern bzw. -brennen und

- Unkonzentriertheit zur Folge.

Als Gründe werden langes Sitzen, die erforderliche starre Blickhaltung, die Mausbedienung, aber auch softwareseitige Aspekte wie eine unlogische, verschachtelte Bedienung und zu viele, oftmals unübersichtliche Anwendungsmöglichkeiten genannt.

Bezogen auf die mit den Arbeitsmitteln dargestellten Inhalte ergab sich folgendes Bild (vgl. Tabelle 4): Mit der Hilfe von Skizzen werden annähernd von allen teilnehmenden Studierenden die Gestalt bzw. räumliche Anordnungen sowie die Funktionseigenschaften des zu konstruierenden Objekts dargestellt. Seltener werden Montage- und Fertigungseigenschaften abgebildet.
Anhand der Darstellung durch das CAD-Modell wurden die Eigenschaften „Form/Geometrie", „Montageeigenschaften", „Größe/Dimension" und „Fertigungseigenschaften" eines Lösungskonzepts bezogen auf die Erkennbarkeit von über der Hälfte der Befragten als „gut" beurteilt.
In parallel zu CAD genutzten Skizzen wird nahezu von allen Befragten die Form bzw. Geometrie dargestellt. Zudem werden sie von der Mehrheit der Befragten für die Abbildung von Größe bzw. Dimension und Design bzw. Ästhetik eingesetzt.
Da die Darstellung relevanter Eigenschaften durch den verwendeten Fragebogen bei Skizzen und parallel zu CAD eingesetzten Skizzen nicht identisch erfasst wurde, ist an dieser Stelle leider nur ein unvollständiger Vergleich möglich.

Tab. 4: Darstellung relevanter Eigenschaften anhand von Skizzen und parallel zu CAD eingesetzten Skizzen; bei CAD: Beurteilung der Erkennbarkeit relevanter Eigenschaften des Lösungskonzepts anhand des CAD-Modells als „gut" (N = 61; Befragungsstudie)

	Häufigkeit der Nennung (in %) (Mehrfachnennung möglich)		
	Skizzen	**CAD**	**Skizzen parallel**
Gestalt/räumliche Anordnung	92	⊥	⊥
Funktionseigenschaften	92	⊥	⊥
Form/Geometrie	⊥	79	92
Größe/Dimension	⊥	62	57
Kinematische Eigenschaften	⊥	25	28
Verformungseigenschaften	⊥	26	16
Festigkeitseigenschaften	⊥	15	13
Fertigungseigenschaften	16	53	34
Montageeigenschaften	36	67	46
Ergonomische Eigenschaften	⊥	31	46
Design/Ästhetik	⊥	39	57

⊥: durch den verwendeten Fragebogen nicht erfasst

6.4.3 Anfertigungs- bzw. Einsatzzwecke von Skizzen und CAD

Befragt nach dem Zweck der Anfertigung von Skizzen, gab die Mehrheit der Studierenden an, damit Ideen für ein Lösungskonzept zu entwickeln, die Kommunikation und Diskussion mit anderen Personen zu unterstützen und neue (Teil-)Lösungen auszuarbeiten (s. Tabelle 5). Von großer Bedeutung ist außerdem die Unterstützung mentaler Repräsentationen sowie die Überprüfung eines Lösungskonzepts. In ihrer Rolle als externer Speicher dienen Skizzen oftmals als kurzfristige Erinnerungshilfe zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses.

Befragt nach dem Einsatzzweck von CAD, berichtete ein überwiegender Teil der Studierenden CAD zur längerfristigen Dokumentation zu nutzen. Deutlich seltener wird CAD zur Unterstützung der Kommunikation und Diskussion mit anderen Personen und zur Überprüfung von Lösungskonzepten eingesetzt. Für keinen der befragten Studierenden bedeutet CAD eine kurzfristige Erinnerungshilfe; nur wenigen dient CAD dazu, bestehende technische Objekte zu analysieren, sich ein Konzept besser vorstellen zu können, Ideen für ein Lösungskonzept zu entwikkeln und Anforderungen zu klären bzw. zu überprüfen.

Parallel zu CAD eingesetzte Skizzen dienen mehr als der Hälfte der Befragten dazu, neue (Teil-)Lösungen auszuarbeiten, Änderungen an bestehenden (Teil-)Lösungen vorzunehmen, Ideen für Lösungskonzepte zu entwickeln und sich ein Konzept besser vorstellen zu können. Weiterhin unterstützen sie die Kommunikation bzw. Diskussion mit anderen Personen und erfüllen den Zweck einer kurzfristigen Erinnerungshilfe.

Die Tabelle 5 stellt die Zwecke der Skizzenanfertigung und des CAD-Einsatzes vergleichend gegenüber.

Tab. 5: Anfertigungs- bzw. Einsatzzwecke von Skizzen, CAD und parallel zu CAD eingesetzten Skizzen (N = 61; Befragungsstudie)

	Häufigkeit der Nennung (in %) (Mehrfachnennung möglich)		
	Skizzen	**CAD**	**Skizzen parallel**
Entwickeln von Ideen für ein Lösungskonzept	89 (Rangplatz 1)	12 (Rp 9)	55 (Rp 3)
Unterstützung der Kommunikation/Diskussion	87 (Rp 2)	43 (Rp 2)	56 (Rp 2)
Ausarbeitung neuer (Teil-)Lösungen	79 (Rp 3)	28 (Rp 4)	64 (Rp 1)
Besseres Vorstellen eines Konzepts	77 (Rp 4)	16 (Rp 7)	51 (Rp 5)
Kurzfristige Erinnerungshilfe	64 (Rp 5)	0 (Rp 10)	51 (Rp 5)
Überprüfen eines Lösungskonzepts	54 (Rp 6)	41 (Rp 3)	23 (Rp 9)
Klären/Überprüfen von Anforderungen	46 (Rp 7)	15 (Rp 8)	39 (Rp 7)
Längerfristige Dokumentation	36 (Rp 8)	82 (Rp 1)	5 (Rp 10)
Analyse bestehender technischer Objekte	33 (Rp 9)	18 (Rp 6)	⊥
Vornehmen von Änderungen an bestehenden (Teil-)Lösungen	⊥	⊥	51 (Rp 5)
Darstellung von Randbedingungen bzw. Systemumgebung	⊥	25 (Rp 5)	25 (Rp 8)

⊥: nicht erfasst

6.4.4 Unterstützungsfunktionen von Skizzen und CAD

Auf die Frage, wobei sie sich durch Skizzen bisher am stärksten unterstützt fühlten, nannten über zwei Drittel der Befragten die Verbesserung der Kommunikation mit Gesprächspartnern (vgl. Tabelle 6). Der Einsatz von Skizzen wirkte sich auch förderlich aus auf das Vergleichen verschiedener Lösungen und das Entstehen neuer Lösungsideen. Ferner erwiesen sich Skizzen bei über der Hälfte der Studierenden als hilfreich beim Ausprobieren von Modifikationen; sie erleichterten die Fehler- und Schwächenerkennung eines Lösungskonzepts und dienten dem aufwandsarmen Fixieren neuer Lösungsideen. Etwa ein Drittel der Teilnehmer wurde sich durch das Erstellen von Skizzen bis dahin unbekannter Anforderungen bewusst und empfand sie als förderlich für das Produktverständnis.

Folgende positive Effekte beim Umgang mit CAD wurden schon häufiger von mindestens einem Drittel der Befragten wahrgenommen: das Erkennen von Fehlern und Schwächen eines Lösungskonzepts, das Erkennen der Auswirkungen von Änderungen auf das Gesamtprodukt, ein besseres Produktverständnis sowie eine Verbesserung der Kommunikation mit Gesprächspartnern. Ein Drittel greift häufig auf die Informationen in älteren Dateien zurück. Hingegen gab nur eine Minderheit an, dass beim Umgang mit CAD neue Lösungsideen entstehen und

ohne Aufwand fixiert werden können. Schwierigkeiten beim Variieren bereits fixierter Lösungen hatte hingegen etwa die Hälfte der Befragten bisher häufiger bemerkt.

Tab. 6: Unterstützende Auswirkungen bzw. wahrgenommene Effekte beim Umgang mit Skizzen und CAD (N = 61; Befragungsstudie)

	Häufigkeit der Nennung (in %) (Mehrfachnennung möglich)	
	Skizzen	**CAD**
Verbesserung der Kommunikation	67 (Rp 1)	34 (Rp 5,5)
Leichteres Vergleichen verschiedener Lösungen	62 (Rp 2)	⊥
Entstehen neuer Lösungsideen	61 (Rp 3)	13 (Rp 8,5)
Erkennen von Fehlern/Schwächen eines Lösungskonzepts	59 (Rp 4)	53 (Rp 1)
Anregung zum Ausprobieren von Modifikationen	54 (Rp 5)	⊥
Aufwandsarmes Fixieren neuer Lösungsideen	46 (Rp 6)	13 (Rp 8,5)
Klarwerden bis dahin unbekannter Anforderungen	34 (Rp 7,5)	23 (Rp 7)
Besseres Produktverständnis	34 (Rp 7,5)	38 (Rp 4)
Leichterer Rückgriff auf Informationen in früheren Skizzen/älteren Dateien	25 (Rp 9)	34 (Rp 5,5)
Leichteres Erkennen der Auswirkungen von Festlegungen bzw. Änderungen auf das Gesamtprodukt	20 (Rp 10)	46 (Rp 2,5)
Schweres Variieren bereits fixierter Lösungen	⊥	46 (Rp 2,5)

⊥: nicht erfasst

6.4.5 Digitales Skizzieren mit automatischer CAD-Weiterverarbeitung

Abschließend wurden die Studierenden gefragt, ob sie die automatische CAD-Verarbeitung von Inhalten, die auf einem Graphiktablett freihandskizziert wurden und nicht der Geometrie von Bauteilen entsprechen (müssen), als hilfreich empfinden würden. Dies wurde von 82 % bejaht. Dabei wurden unter anderem die folgenden denkbaren Vor- und Nachteile des digitalen Skizzierens und dessen automatischer Integration in CAD im Sinne einer geschlossenen Informationskette genannt:

Vorteile:

- Arbeiten in nur einem kompakten System
- Schnelles Korrigieren möglich durch unproblematisches Entfernen von Elementen
- Lückenlose Dokumentation des Entwurfsprozesses durch Speichermöglichkeit
- Kommunikation mit entfernt lokalisierten Partnern wird erleichtert
- Unproblematisches Integrieren von Regelgeometrie und größere Variabilität an Werkzeugeigenschaften schon in den frühen Entwurfsphasen

- Anwenden von PC-Funktionen wie Zoomen, Kopieren etc.
- Zeitersparnis bei automatischer Umsetzung in CAD

Nachteile:

- Entsprechender Bildschirm erforderlich
- Übertragung der Freihandskizze in ein CAD-Modell erfordert eventuell aufwendiges Nachbearbeiten
- Am Bildschirm lassen sich mehrere Skizzen nicht parallel betrachten
- Skizzier- und Darstellungsqualität auf dem Bildschirm eventuell nicht mit Papier und Bleistift vergleichbar.

6.5 Zusammenfassende Schlussfolgerungen für die experimentelle Pilotstudie

Im Hinblick auf die Nutzungshäufigkeit ergab die Befragung, dass nahezu die gesamte studentische Stichprobe Freihandskizzen zur Anforderungsklärung und zur Konzeptentwicklung einsetzt. Immerhin die Hälfte der Befragten nutzt unter anderem 2D-CAD in den frühen Entwurfsphasen, vorrangig in Form des Programms AutoCAD. Diese Ergebnisse decken sich mit den Befunden einer Befragung berufserfahrener Konstrukteure. Auch hier ließ sich eine Dominanz von Skizzen und CAD gegenüber den Modellarten ausmachen: 95 % der befragten Konstrukteure nutzen Freihandskizzen, 76 % maßhaltige Skizzen; 67 % verwenden 2D- und 3D-CAD, wohingegen nur 52 % einfache bzw. 37 % einfachste Modelle einsetzen (Römer, Weißhahn, Hacker & Pache, 2001; Römer, 2002; vgl. auch Sachse et al., 1995).
In der Konsequenz spricht dies für eine experimentelle Untersuchung der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und „CAD“ in den entscheidenden Abschnitten des Entwurfsprozesses.

Skizzen dienen der Mehrheit der befragten Studierenden zum Entwickeln von Lösungsideen, zum Ausarbeiten und Überprüfen von Lösungskonzepten und zur Unterstützung des dafür erforderlichen Aufbaus und der Modifikation mentaler Repräsentationen. CAD findet für diese Zwecke bis auf das Überprüfen von Lösungskonzepten kaum Verwendung.
Als externe Speicher entlasten Skizzen das Arbeitsgedächtnis und unterstützen die Kommunikation mit Gesprächspartnern. Auch bei CAD spielen die Kommunikation sowie das Überprüfen von Konzepten eine Rolle, eine gedächtnisentlastende Funktion in Form einer kurzfristigen

Erinnerungshilfe wird jedoch von keinem der Befragten berichtet. Im Gegensatz zu Skizzen wird CAD hauptsächlich zur längerfristigen Dokumentation eingesetzt.

Die Ergebnisse zu den Anfertigungs- bzw. Einsatzzwecken von Skizzen und CAD zeigen, dass sich Skizzen nach Meinung der Befragten besser für die Belange der frühen Entwurfsphasen eignen. Dies wird auch durch die im Umgang mit beiden Arbeitsmitteln wahrgenommenen Effekte belegt: Skizzen regen zu Modifikationen an und bedingen im Gegensatz zu CAD häufig neue Lösungsideen; sie fördern somit eine kreative und innovative Arbeitsweise. Die Lösungsideen lassen sich zudem schnell und aufwandsarm fixieren.
Diese unterstützenden Auswirkungen wurden vom Arbeitsmittel „CAD“ nicht berichtet. Nahezu die Hälfte der Befragten empfindet hier zudem das Variieren bereits fixierter Lösungsideen als Schwierigkeit. Der Gebrauch von Software animiert jedoch zum häufigeren Rückgriff auf Informationen in älteren Dateien und lässt Auswirkungen von Änderungen auf das Gesamtprodukt leichter erkennen.
Um die von CAD-Programmen nur defizitär erfüllten Anforderungen der frühen Entwurfsabschnitte zu kompensieren, nutzen zwei Drittel der befragten Studierenden häufig oder immer eigens zur Vorbereitung der Arbeit mit CAD Skizzen; drei Viertel skizzieren mindestens hin und wieder während der Arbeit mit CAD.

Während nahezu alle Befragten davon überzeugt sind, durch das Skizzieren schneller bessere Lösungskonzepte zu entwickeln, war hinsichtlich des Arbeitsmittels „CAD“ nur etwa ein Drittel dieser Meinung. Ferner wurden die verwendeten CAD-Programme von einem Großteil der Studierenden als aufwendig und wenig intuitiv bezüglich der Bedienung beschrieben. Zwei Drittel können regelmäßig Festlegungen nicht ihren Vorstellungen entsprechend umsetzen, ein Drittel klagt über ergonomische Probleme, die eine erhöhte Beanspruchung zur Folge haben.
Über die Hälfte der Befragten gab jedoch an, dass sich anhand der Darstellung durch das CAD-Modell die relevanten Eigenschaften „Form/Geometrie“, „Größe/Dimension“, „Montage“ und „Fertigung“ eines Lösungskonzepts gut erkennen lassen.
Diese sehr unterschiedlichen Auswirkungen und wahrgenommenen Effekte sprechen für die Notwendigkeit, einer differenzierten experimentellen Betrachtung beider Arbeitsmittel in den Bereichen der Ergebnisse, des Erlebens und des Prozesses bezogen auf die frühen Entwurfsphasen.

Im Hinblick auf die Vorgehensweise zeigte sich eine klare Präferenz für eine vollständige Anforderungsklärung und für das generierende Vorgehen zu Beginn des Entwurfsprozesses.

Schwierigkeiten in den frühen Phasen werden von den Befragten vor allem in Verbindung mit dem Aufbau und der Transformation mentaler Repräsentationen berichtet.
Die experimentelle Methodik muss folglich derart gestaltet werden, dass sie Aussagen darüber zulässt, mit welchem Arbeitsmittel sich die bevorzugten Vorgehensweisen in den frühen Entwurfsabschnitten unter Vermeidung der genannten Schwierigkeiten am effektivsten und effizientesten realisieren lassen.

7 Experimentelle Pilotstudie: Testen der Problemstellungen und der Methodik auf ihre Eignung

7.1 Ziel- und Fragestellungen

In einem zweiten Schritt wurde eine laborexperimentelle Pilotstudie durchgeführt und damit die ausgewählten bzw. entwickelten Problemstellungen auf ihre Verständlichkeit und Bearbeitbarkeit im vorgesehenen Zeitrahmen hin erprobt. Ferner sollte die entwickelte (Auswertungs-) Methodik überprüft werden, um vor deren Einsatz in der Hauptuntersuchung gegebenenfalls entsprechende Modifikationen vornehmen zu können. Die zentralen Fragen waren folglich:

- Sind die gewählten Problemstellungen verständlich und von Studierenden bearbeitbar?
- Ist die (Auswertungs-)Methodik für einen Einsatz in der Hauptuntersuchung geeignet?

Die Schemata zur Erfassung und Auswertung der interessierenden Variablen sollten in der Pilotstudie auf ihre Objektivität getestet werden. Im Bezug auf die Prozessvariable „Entwurfsschritte“, die detaillierte Erkenntnisse über die Vorgehensweise beim Entwerfen mit den verschiedenen Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“, „Graphiktablett“ und „CAD“ erbringen sollte, diente die Voruntersuchung dazu, ein geeignetes Kategoriensystem zu erstellen.

7.2 Untersuchungsdesign

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, mögliche Unterschiede im Unterstützungspotential verschiedenartiger Arbeitsmittel in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens zu prüfen. Der Einfluss des Entwerfens durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und des rechnergestützten Entwerfens auf relevante Variablen aus den Bereichen „Ergebnisse“, „Erleben“ sowie „Prozess“ sollte anhand einer gezielt ausgewählten Problemstellung experimentell geprüft werden.

Dazu wurde folgende Gruppeneinteilung gewählt:

(1) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift

Den Probanden standen zur Erarbeitung der konstruktiven Lösung Zeichenpapier, Bleistifte und ein Radiergummi zur Verfügung.

(2) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett

Die Probanden sollten zur Lösungserarbeitung ein Graphiktablett nutzen, mit dem freihandskizziert werden kann.

(3) Rechnergestütztes Entwerfen

Die Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung sollte ausschließlich am Rechner mit dem Programm AutoCAD erfolgen. Diese Versuchsbedingung muss als eher künstlich geschaffene Laborbedingung gelten und entspricht in ihrer klaren Abgrenzung zumeist nicht der in der Realität vorfindbaren Konstruktionspraxis. Eine derartige Einteilung erwies sich jedoch als notwendig, um die Wertigkeit der Unterstützung der Arbeitsmittel getrennt voneinander betrachten zu können.

Unter Berücksichtigung der genannten drei Versuchsbedingungen mit gezielter Variation des Arbeitsmittels wurde zunächst ein einfaktorieller Randomisierungsplan mit drei Stufen gewählt. Hierbei bearbeiteten die sechs Probanden der Pilotstudie das Entwurfsproblem „Gartengrill“ (s. Abschnitt 7.4.1.1). Der Plan wurde hinsichtlich des Faktors „Arbeitsmittel“ auf vorher festgelegte abhängige Variablen (s. Teilkapitel 7.6) ausgewertet.

Tab. 7: Untersuchungsplan der Pilotstudie (N = 6; Entwurfsproblem „Gartengrill“): einfaktorieller Randomisierungsplan mit drei Stufen

	R
Experimentelle Bedingung	
(1) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift	n = 2
(2) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett	n = 2
(3) Rechnergestütztes Entwerfen	n = 2

Eine Zielstellung im Rahmen der vorliegenden Arbeit war die Replikation der im ersten Untersuchungsteil bei der Problemstellung „Gartengrill“ erhaltenen Ergebnisse. Im Falle bedeutsamer Unterschiede zwischen den Probanden der verschiedenen experimentellen Bedingungen sollte in einem zweiten Schritt überprüft werden, ob sich die Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill“ replizieren lassen bzw. ob diese ausschließlich problemspezifisch sind (s. Teilkapitel 8.1).

Aufgrund dieser Zielstellung wurde ein im Schwierigkeitsgrad vergleichbares Entwurfsproblem gewählt, d. h., der Faktor „Aufgabenschwierigkeit“ war in dieser Untersuchung *nicht* von Bedeutung. Ein (2 x 3)-Plan, der die Berechnung etwaiger Wechselwirkungseffekte erlaubt, war daher nicht möglich.

Die funktionalen Lösungsanforderungen beider Entwurfsprobleme waren nach der Meinung von Experten unterschiedlich, so dass *kein* Transfer zu erwarten war. Die Problemstellung

„Gartengrill“ beinhaltete andere Zielstellungen und erforderte andere Funktionsmechanismen zur Lösung. Ihre Bearbeitung hatte weder im Hinblick auf das inhaltliche Lösungsprinzip noch auf die Lösungsstrategie Einfluss auf die der Problemstellung „Korkenzieher“ (s. Abschnitt 7.4.1.2). Reihenfolgeeffekte waren daher auszuschließen und mussten nicht extra kontrolliert werden.

Im zweiten Untersuchungsteil bearbeitete dieselbe Stichprobe (N = 6) das vergleichbar schwere Entwurfsproblem „Korkenzieher“ mit einem anderen Arbeitsmittel. Der Wechsel des Arbeitsmittels erfolgte insbesondere, da bei der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ eine nochmalige Problembearbeitung mit diesem neuartigen Arbeitsmittel möglicherweise im Sinne der sog. Testwiseness zu einem gerätebezogenen Lerneffekt geführt hätte. Keiner der Probanden hatte vor dieser Untersuchung mit dem Graphiktablett gearbeitet.

Tab. 8: Untersuchungsplan der Pilotstudie (N = 6; Replikation: Entwurfsproblem „Korkenzieher“): ausbalancierter einfaktorieller Plan mit drei Stufen

Experimentelle Bedingung	
(1) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift	n = 2
(2) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett	n = 2
(3) Rechnergestütztes Entwerfen (2D-CAD)	n = 2

7.3 Stichprobe

Die Rekrutierung berufserfahrener Konstrukteure war in der für eine statistische Datenauswertung im Rahmen der experimentellen Hauptuntersuchung notwendigen Anzahl aus mehreren bekannten, vor allem auch finanziellen Gründen nicht zu leisten. Um dennoch weitgehend aussagekräftige und generalisierbare Ergebnisse zu erhalten und zugleich Erkenntnisse über Konsequenzen für den Lehr- und Lernprozess beim Entwerfen zu gewinnen, empfahlen sich in dieser Arbeit Studierende des Maschinenwesens im Hauptstudium als Untersuchungspopulation.
Die Stichprobe der Pilotstudie umfasste fünf männliche und eine weibliche Studierende aus der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden im Hauptstudium (fünftes bis einschließlich achtes Semester). Zwei Probanden entstammten der Studienrichtung „Allgemeiner und konstruktiver Maschinenbau“, jeweils einer den Fachrichtungen „Kraftfahrzeug- und Schienentechnik“, „Textil- und Konfektionstechnik“, „Verfahrens- sowie Verarbeitungstechnik“. Ihr durchschnittliches Alter lag bei 22 Jahren (SD = 1.37).

Keiner der Teilnehmenden hatte vor dem Studium eine Lehre absolviert, einer konnte im Rahmen eines Praktikums Einblicke in den Konstruktionsbereich gewinnen. Alle sechs Studierenden hatten mindestens eine zweieinhalbjährige Erfahrung mit dem Programm *AutoCAD*, einer arbeitete zusätzlich mit den 3D-CAD-Programmen *ProE* und *Solidworks*. Ihre Fähigkeiten im Konstruieren schätzten zwei der Probanden (33,3 %) als ausreichend, drei (50 %) als befriedigend und einer (16,7 %) als gut ein.

Die wesentlichen demographischen Daten und qualifikationsbezogenen Informationen fasst die Tabelle 9 getrennt nach den sechs Probanden zusammen:

Tab. 9: Demographische Daten und qualifikationsbezogene Informationen der Probanden aus der Pilotstudie (N = 6)

Proband	Studienrichtung	Semester	Praktikum	CAD-Kenntnisse	Selbsteinschätzung im Konstruieren
1	Textil- und Konfektionstechnik	5	nein	AutoCAD	ausreichend
2	Kfz- und Schienentechnik	7	nein	AutoCAD	befriedigend
3	Verarbeitungstechnik	6	nein	AutoCAD	befriedigend
4	Allgemeiner und konstruktiver Maschinenbau	6	nein	AutoCAD ProE, Solidworks	gut
5	Allgemeiner und konstruktiver Maschinenbau	8	ja	AutoCAD	befriedigend
6	Verfahrenstechnik	6	nein	AutoCAD	ausreichend

7.4 Untersuchte Entwurfsprobleme

7.4.1 Beschreibung der konstruktiven Problemstellungen

Während sich die herkömmlichen Experimente der klassischen Denkpsychologie vorzugsweise mit wissensfreien bzw. wissensarmen Interpolationsproblemen (z. B. „Turm von Hanoi“, Klix, 1971; „Neun-Punkte-Problem“, Maier, 1933) beschäftigen, handelt es sich bei sog. „design problems“ ausschließlich um komplexe und wissensreiche Probleme. Diese sind in der Regel unvollständig und nicht präzise definiert (Reitman, 1964, 1965; Rittel & Webber, 1984; Simon, 1973; Goel, 1995). Um sie zu bewältigen, muss der Problemlöser Wissen aktivieren und in Beziehung setzen (Dörner, 1976; Pahl, 1994; Kintsch et al., 1996; Sachse et al., 1997; Hacker, 1998b). Zusätzlich müssen Informationen durch eigene Entscheidungen bereitgestellt werden.
Der konstruktiven Problemstellung kommt bei der experimentellen Analyse von Entwurfsprozessen eine zentrale Bedeutung zu, da sie den Prozess wesentlich beeinflusst. Von ihrer Kom-

plexität, ihrem Neuheitsgrad und Umfang hängen sowohl die Vorgehensweise der Versuchsperson als auch die Unterstützungsfunktion und -effizienz von Arbeitsmitteln ab. Entsprechend den Zielstellungen der Pilotstudie wurden beide Entwurfsprobleme nach den folgenden Kriterien gestaltet:

- Es sollte sich um realitätsnahe konstruktive Aufträge handeln, deren grundlegende Anforderungen als typisch für den Maschinenbau gelten können.
- Es wurde darauf geachtet, dass die Konstruktionsobjekte aus dem Alltag bekannte Gegenstände darstellen, die jedem der studentischen Probanden auch ohne spezielles Fachwissen geläufig, jedoch in der geforderten Weise nicht im Handel erhältlich sind.
- Die konstruktiven Probleme sollten neben verschiedenen Festforderungen - also Bedingungen, denen die Lösung voll zu entsprechen hat - auch eine Mindestforderung (vgl. Kesselring, 1951), aber keinen Berechnungs- und Auslegungsanteil beinhalten.
- Sie sollten sich von der beschriebenen Stichprobe mit technischen Grundkenntnissen und konstruktivem Grundwissen in einem zeitlichen Rahmen von max. zwei Stunden lösen lassen.

Der Untersuchungsthematik entsprechend lag der Schwerpunkt auf den frühen Entwurfsphasen. Da bei einer studentischen Stichprobe keine Berufserfahrung vorhanden ist, war der inhaltliche Neuheitsgrad ausreichend für eine Problem- und infolgedessen Kreativitätsorientierung. Die Originalfassungen der Problemstellungen mit den entsprechenden Instruktionen finden sich im Anhang A6 bis A10.

7.4.1.1 Entwurfsproblem „Gartengrill“

Das Angebot an Grillgeräten einer Firma, die verschiedene Küchengeräte produziert, sollte um ein Modell mit folgenden spezifischen Eigenschaften erweitert werden:

Tab. 10: Fest- und Mindestforderung(en) des Entwurfsproblems „Gartengrill“

1	Stufenlose Verstellbarkeit (5 – 25 cm) des Abstands zwischen Grillrost und Kohlepfanne
2	Für Verstellung keine direkte Berührung von Grillrost und Kohlepfanne erforderlich (auch nicht mit einer Zange oder mittels eines einhakbaren Griffs)
3	Leichte Entnehmbarkeit von Grillrost und Kohlepfanne zur Reinigung
4	Hitzebeständigkeit aller Teile in Nähe der Kohlepfanne
5	Wetterfestigkeit des gesamten Geräts
6	Transportabilität → Gewicht so gering wie möglich (Mindestforderung)
7	Keine elektrischen Bestandteile

Diese konstruktive Problemstellung hatte sich unter ähnlichen thematischen Gesichtspunkten in früheren Untersuchungen bereits bewährt (Römer, 2002; Schütze, Sachse & Römer, 2001; Schütze, Sachse & Römer, 2003; Schütze, 2000).

7.4.1.2 Entwurfsproblem „Korkenzieher“

Die Problemstellung im anschließenden zweiten Untersuchungsteil verlangte die Entwicklung eines neuartigen Korkenziehermodells für Menschen mit einer Arm- und Handbehinderung.

Tab. 11: Fest- und Mindestforderungen des Entwurfsproblems „Korkenzieher“

1	Einfache Bedienbarkeit von Menschen mit einer Arm- und Handbehinderung
2	Entkorkung mit einer Hand ohne Kraftaufwand
3	Entkorkung ohne Verletzungsgefahr
4	Transportabilität, keine feste Verschraubung an einem Platz → Gewicht und Größe so gering wie möglich (Mindestforderungen)
5	Keine elektrischen Bestandteile

7.4.2 Zur Anforderungsstruktur der konstruktiven Problemstellungen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Vergleich der verschiedenartigen Arbeitsmittel hinsichtlich ihres Unterstützungspotentials für die frühen Entwurfsabschnitte. Falls beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ Unterschiede in Abhängigkeit von den genutzten Arbeitsmitteln beobachtet werden, bestand ein weiteres Ziel in der Replikation dieser Befunde. Um eine Konfundierung zwischen Inhaltseffekten und der Problemschwierigkeit zu vermeiden, war eine Problemstellung notwendig, die einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad aufweist, aber keine inhaltlichen Transfermöglichkeiten beinhaltet.

Die Untersuchung von Unterstützungsmöglichkeiten erfordert es, die Merkmale der zu lösenden Entwurfsprobleme zu beschreiben, aus denen die Anforderungen an den Bearbeiter erwachsen. Hierbei lassen sich im Rahmen einer theoriegeleiteten Klassifikation Varianten-, Anpassungs- und Neukonstruktionen als gebräuchlichste Konstruktionsarten bei technischen Systemen unterscheiden (Pahl & Beitz, 1997). Zur vergleichenden Bewertung der Anforderungen der Entwurfsprobleme wurde das Verfahren der theoretischen Problem- und Aufgabenanalyse [PAA] (Schroda, Leinert & Sachse, 1996; Schroda & Hacker, 1998; Schroda, 1999, 2000) genutzt. Die Anforderungshöhe von Konstruktionsaufträgen kann demnach durch folgende sechs Kriterien beschrieben werden (vgl. auch Hacker, 1998a):

- Widersprüchliche Ziele

- Komplexität
- Transparenz
- Freiheitsgrade
- Dynamik
- Erforderliches Wissen.

Vor Beginn der experimentellen Untersuchung wurden die Anforderungsstrukturen sowohl von praktisch tätigen Konstrukteuren als auch von Maschinenbau-Ingenieuren des Lehrstuhls Konstruktionstechnik/CAD der TU Dresden (N = 4 bzw. 5) mit langjähriger Erfahrung im Beurteilen konstruktiver Aufgabenstellungen einzeln und gesondert mit Bezug auf studentische Bearbeiter geprüft und bewertet. Der Bewertung der genannten Kriterien lagen jeweils zwei bzw. drei fünfstufige Ratingskalen zugrunde. Die Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der Anforderungsstrukturanalyse für beide Problemstellungen.

Tab. 12: Anforderungsstruktur der Entwurfsprobleme „Gartengrill" und „Korkenzieher"

	Gartengrill		**Korkenzieher**	
Anforderungsmerkmal	**MW** (N = 4) **(SD; SE)**	**Bewertung/ Klassifikation**	**MW** (N = 5) **(SD; SE)**	**Bewertung/ Klassifikation**
Widersprüchliche Ziele	2,17 (.34; .17)	Wenige	2,38 (.43; .22)	Wenige
Komplexität	2,67 (.00; .00)	Mittel	2,50 (.42; .21)	Mittel
Intransparenz	3,17 (.58; .29)	Mittel	3,09 (.63; .31)	Mittel
Freiheitsgrade	3,00 (.82; .41)	Mittel	3,13 (.25; .13)	Mittel
Dynamik	2,17 (.43; .22)	Mittel	2,50 (.43; .22)	Mittel
Erforderliches Wissen	2,38 (.25; .13)	Mittel	2,88 (.25; .13)	Mittel
Gesamtwert für die Anforderungshöhe des Entwurfsproblems	**2,59 (.19; .10)**	**Anpassungskonstruktion**	**2,72 (.13; .06)**	**Anpassungskonstruktion**

Betrachtet man die Kriteriendurchschnittswerte, so lässt sich feststellen, dass sich die beiden Problemstellungen in ihren Anforderungen kaum unterscheiden. Der nahezu identische Gesamtwert von 2,59 bzw. 2,72 spricht für einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad. Die Kriterienwerte befinden sich ausnahmslos im mittleren Wertebereich 2 bis 4, d. h., beide Problemstellungen sind aufgrund ihrer Merkmale zur Klasse der sog. Anpassungskonstruktionen zu zählen.

Die interpersonale Urteilerübereinstimmung als Maß für die Reliabilität der Einstufung wurde durch den Prozentbereich der übereinstimmenden Urteile quantifiziert. Dabei ging die Beurtei-

lung der einzelnen Items, nicht nur deren Durchschnittswert auf Kriterienebene in die Urteilerkonkordanz ein.

Pro Problemstellung sollte ein individueller Vergleich der urteilenden Personen innerhalb der Kriterien getrennt für jedes Item erfolgen. Dazu wurden die vier bzw. fünf Beurteiler erschöpfend zu sechs bzw. zehn möglichen Paaren kombiniert und bei jedem Beurteilerpaar nach Problemstellungen getrennt die pro Item vergebenen Urteile verglichen. Zur Bestimmung der Urteilerkonkordanz wurde das gewichtete Kappa verwendet (Cohen, 1972, 1992, in Bortz, Lienert & Boehnke, 1990, 483). Da die Mittelung der berechneten Prozentwerte über die Gesamtanzahl der Urteilerpaare einen umständlichen und zum Teil in wenig plausiblen Resultaten mündenden Weg darstellt (vgl. Bortz et al., 1990, 449, 465f.), wurde der Grad der Konkordanz durch den Bereich des niedrigsten und des höchsten errechneten Prozentwerts festgelegt.

Für das Entwurfsproblem „Gartengrill“ lag die interpersonale Urteilerübereinstimmung zwischen 72 und 86 %, für den Korkenzieher zwischen 72 und 89 %. Als Richtwert wird in der Literatur eine 50%ige Urteilerkonkordanz der Experten angegeben (Greve & Wentura, 1987).

7.5 Experimentelle Bedingungen

7.5.1 Bedingung (1) „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“

Die Probanden dieser Versuchsbedingung sollten zur Lösungsfindung freihandskizzieren. Dazu standen weißes DIN A4-Zeichenpapier, Bleistifte verschiedener Härtegrade und ein Radiergummi zur Verfügung. Da als Ergebnis kein maßstäblicher Entwurf in Form einer technischen Zeichnung verlangt war, wurde die Nutzung zusätzlicher Hilfsmittel wie Lineal oder Zirkel auch auf Nachfrage nicht gewährt.

7.5.2 Bedingung (2) „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“

Unter dieser experimentellen Bedingung sollte das Entwerfen als Freihandskizzieren mit einem Graphiktablett für die Stifteingabe direkt auf der Bildschirmoberfläche erfolgen. Die Teilnehmer der Pilotstudie arbeiteten mit dem zum Untersuchungszeitpunkt seit zwei Jahren erfolgreich eingeführten Modell WACOM *PL-400*. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen 2,9 kg schweren Monitor mit 13,3`` großem Display (Diagonale 33,8 cm) und einer Farbtiefe von 18 Bit.

Als Software fungierte das mitgelieferte Programm *ParaGraph PenOffice*^{TM}, das im Zeichenmodus sowohl das Skizzieren und Zeichnen als auch das Schreiben von Hand auf dem Bildschirm ermöglicht. Das Programm ist aufgrund der begrenzten Anzahl der mittels aussagekräf-

tiger Symbole dargestellten Funktionen weitestgehend selbsterklärend und bedarf keiner längeren Einarbeitung. Dies war im Rahmen der Untersuchung von entscheidender Bedeutung für eine valide Erhebung der interessierenden Variablen. Es sollte verhindert werden, dass die Vorerfahrungen mit einer speziellen Software zu ungleichen Voraussetzungen innerhalb der Stichprobe führen. Daher wurde auf das komplexere und auch kompliziertere Mal- und Zeichenprogramm *Corel Painter Classic,* das über 100 Malwerkzeuge beinhaltet und sowohl eine angenehmere Nutzung hinsichtlich der Zeichenqualität als auch kreativere Anwendungen erlaubt, verzichtet.

7.5.3 Bedingung (3) „Rechnergestütztes Entwerfen“

Probanden der dritten experimentellen Bedingung arbeiteten mit dem CAD-Programm *AutoCAD®* der Firma Autodesk. Mit der verwendeten Version *AutoCAD Release 14* hatten alle Teilnehmer im Rahmen des Studiums bereits mehrjährige praktische Erfahrungen gesammelt. Das Programm war auf einem Rechner mit einem 19``-Flachbildschirm installiert. Als Eingabegeräte konnten Maus und Tastatur verwendet, und die Befehle somit direkt oder durch Auswahl aus dem dynamischen Bildschirmmenü eingegeben werden.

7.6 Übersicht über die Homogenisierungs- und abhängigen Variablen sowie ihre Erfassung

Die für die Untersuchung relevanten Homogenisierungs- und abhängigen Variablen sowie die Methoden ihrer Erfassung sind in der Tabelle 13 aufgeführt.

Tab. 13: Übersicht über die Homogenisierungs- und abhängigen Variablen sowie ihre Erfassung

Homogenisierungsvariablen	**Datenerfassung**
• Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung • Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung	• Siebenstufige Likertskalen • Dreidimensionaler Würfeltest (Gittler, 1990)
Abhängige Variablen	**Datenerfassung**
I. Ergebnisvariablen	
• Lösungsgüte	• Expertenbeurteilung entsprechend Bewertungsschema
• Bearbeitungszeit	• Zeitmessung
• Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts	• Expertenbeurteilung entsprechend Bewertungsschema

II. Variablen des Erlebens	
• Erlebte Problemschwierigkeit	• Bipolare Ratingskala
• Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit	• Bipolare Ratingskala
• Psychische Beanspruchung	• Bipolare Ratingskalen (Plath et al., 1984)
III. Prozessvariablen	
• Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten	• Computergestützte Prozessprotokollierung, Videoprotokoll
(•Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte)	(• Analyse der Entwürfe, Videoprotokoll)
• Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen	• Analyse der Entwürfe, Videoprotokoll

7.6.1 Operationalisierung der Homogenisierungsvariablen

Um eine weitere Homogenisierung der Stichprobe zu gewährleisten, wurden neben den bereits erwähnten individuellen Leistungsvoraussetzungen aufgrund bekannter Beziehungen zu der geforderten Leistung die Motivation der Untersuchungsteilnehmer zur Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung sowie deren Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung kontrolliert.

7.6.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung

Wie zielgerichtet jemand eine konstruktive Problemstellung bearbeitet, wird maßgeblich durch die Stärke seiner Motivation bestimmt. Die Motivation des Probanden ist ein wesentlicher Interpretationshintergrund der Ergebnis- und Prozessvariablen.

Im allgemeinen wurde sie als beanspruchungsrelevante Komponente des Befindens durch die Ratingskalen nach Plath et al. (1984) erhoben (s. Abschnitt 5.2.3). Die spezifische Motivation zur Bearbeitung des Entwurfsproblems wurde direkt vor dessen Erhalt mit vier vorgegebenen Aussagen zum „Commitment“ erfasst. Bezüglich derer schätzte sich die Versuchsperson jeweils auf einer Likertskala mit sieben Antwortkategorien (von 1: „trifft überhaupt nicht zu“ bis 7: „trifft völlig zu“) ein. Der Wert hierfür ergab sich aus dem Durchschnitt der vier teilweise umgepolten Skalenwerte. Die entsprechenden Skalen können im Anhang A5 eingesehen werden.

7.6.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung

Die Generierung mentaler Repräsentationen von dreidimensionalen Gegenständen hoher Komplexität bildet die Grundlage für den effizienten Einsatz von Operationen zur Verarbeitung

räumlicher Informationen angesichts verschiedener Anforderungen (von der Weth, 1994). So lassen sich an Vorstellungsbildern im Sinne des gedanklichen Probehandelns mentale Transformationen und Simulationen von Bewegungen durchführen, die als Prüfprozesse der Analyse und Bewertung von Lösungen dienen (Ehrlenspiel et al., 1991). Diese können sich erfolgsfördernd auswirken, belasten allerdings auch in erheblichem Maße das Arbeitsgedächtnis. Nach Fricke (1993) lässt das weitestgehend automatisierte, ganzheitlich-räumliche Vorstellen jedoch eher kognitive Kapazitäten für die eigentlichen konstruktiven Handlungen frei als rein logisch-analytisches Vorstellen.

Zur Messung der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung (vgl. dazu Maier, 1999) wurde die Kurzform des Dreidimensionalen Würfeltests von Gittler (1990) mit acht Teilaufgaben gewählt, welche in einem Zeitraum von maximal 25 Minuten bearbeitet werden sollten. Dabei hatte der Proband durch mentales Rotieren zu entscheiden, ob eine von sechs vorgegebenen Lösungsalternativen einem Referenzwürfel entsprach. Je nach Anzahl der richtig beantworteten Teilaufgaben wurde die Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung als weit unterdurchschnittlich, unterdurchschnittlich, durchschnittlich oder überdurchschnittlich verglichen mit der entsprechenden Eichstichprobe (Studenten Technischer Universitäten) klassifiziert.

7.6.2 Operationalisierung der abhängigen Variablen

7.6.2.1 Ergebnisvariablen

Lösungsgüte

Die Beurteilung der Qualität der erzeugten Entwurfslösungen erfolgte bei beiden Problemstellungen nach Beurteilungsschemata. Dadurch wurde eine bessere Nachvollziehbarkeit und teilweise Quantifizierbarkeit angestrebt. Bei der Erstellung beider Schemata wurde darauf geachtet, dass diese eine möglichst objektive, reliable und valide Einschätzung der Lösungsgüte erlauben. Angelehnt an das Beurteilungsverfahren von Langner (1991) wurden folgende allgemeine, von der konkreten Problemstellung unabhängige Qualitätskriterien zu Grunde gelegt:

- Funktion
- Fertigung
- Montage
- Gestaltung
- Zuverlässigkeit
- Benutzerfreundlichkeit/Gebrauch.

Das Kriterium *Funktion* beinhaltet Aussagen zum Zweck eines Produkts und seiner Teile. Beim Kriterium *Fertigung* werden Fertigungsverfahren und -aufwand näher betrachtet. Die Dimensi-

on *Montage* bewertet Möglichkeiten der Montage und Demontage des Produkts einschließlich der dafür erforderlichen Werkzeuge. Der Aspekt *Gestaltung* betrifft die Bewertung der Grob- und Feingestalt der Konstruktion hinsichtlich Eindeutigkeit (Wirkung und Verhalten) und Einfachheit (geringe Teileanzahl etc.) sowie die Bewertung des gewählten Materials. Die Prüfung des Gebrauchsverhaltens hinsichtlich Ausfallgefahr sowie die Haltbarkeit und Lebensdauer des Produkts sind im Kriterium *Zuverlässigkeit* zusammengefasst. Die Dimension *Benutzerfreundlichkeit/Gebrauch* beschäftigt sich mit den Anwendungsmöglichkeiten, der Handhabbarkeit und dem Design unter Beachtung ergonomischer und sicherheitsgerechter Aspekte. In der Zusammenschau ermöglichen die genannten Aspekte Aussagen zur Gesamtqualität der Konstruktion.

Langner (1991) und Rückert (1997) haben ein allgemeines, von der konkreten Problemstellung unabhängiges Beurteilungsschema entwickelt, mit dem die Lösungsgüte auf dem Niveau der einzelnen Subkriterien numerisch erfassbar ist. Damit können die Lösungen unterschiedlicher Konstruktionsaufträge in ihrer Güte direkt miteinander verglichen werden. Eine individuelle, den spezifischen Anforderungen gerecht werdende Bewertung lässt sich jedoch nur dann erreichen, wenn man die Kriterien entsprechend den tatsächlichen Erwartungen an das funktionserfüllende Element bzw. die zu realisierende Teil- oder Gesamtfunktion detailliert.
Bei den in dieser Arbeit verwendeten Problemstellungen sollte den gegebenen Bedingungen und den damit verbundenen Forderungen Rechnung getragen werden; so steht z. B. beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ aufgrund der Zielgruppe Behinderter die Sicherheit bei der Bedienung des Geräts im Vordergrund. Zur Bewertung der Entwurfslösungen wurden die qualitätsbestimmenden Aspekte unter Einbeziehung der obengenannten sechs Kriterien hauptsächlich aus den konkreten Anforderungen der Problemstellung abgeleitet. Sie wurden für beide Entwurfsprobleme getrennt in Form eines Schemas auf einer vierstufigen Skala anforderungsabhängig konkretisiert und problemspezifisch gewichtet. Ein direkter Vergleich von Beurteilungsergebnissen beider Problemstellungen war folglich nicht möglich.
Die eigentliche Bewertung erfolgte durch das Vergeben von Punkten, in denen sich die Wertvorstellung des Beurteilers im Hinblick auf die entsprechenden Kriterien ausdrückte. Je nachdem Grad der Erfüllung der Anforderung wurde ein Wert zwischen 0 („minimal erfüllt“) und 3 („nahezu ideal erfüllt“) vergeben. Bei den in dieser Entwurfsphase oftmals nicht eindeutig bekannten Eigenschaften der konstruktiven Lösung erschien dieses eher kleine Wertspektrum ausreichend. Bezüglich der formulierten unabdingbaren Festforderungen war die Lösung beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ jeweils durch eine binäre Ja-/Nein-Entscheidung zu beurteilen. Dabei entsprach „Ja“ dem Punktwert „3“, „Nein“ dem Punktwert „0.“ Beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ war nur eine der drei Festforderungen binär zu prüfen. Konstruktionen, die

bereits eine dieser Forderungen nicht erfüllen, sind eigentlich als Lösung nicht akzeptabel und entziehen sich damit einer weiteren Bewertung. Festforderungen sollten nur als Ausscheidungs-, jedoch nicht als Auswahlkriterien herangezogen werden (VDI 2225, 1997; Breiing et al., 1993). Da es sich hier jedoch um Entwürfe der frühen Phasen handelte, bezog man diese Lösungen dennoch mit in die Beurteilung ein. Erst bei zwei nichterfüllten der insgesamt drei Festforderungen wurde der Entwurf von der weiteren Bewertung ausgeschlossen und erhielt den Wert „0“ für die Lösungsgüte.
Ein Ausgleich für diese Verfahrensweise wurde über die unterschiedliche Gewichtung der Forderungen im Kontext der Problemstellung verfolgt. Als eine brauchbare Gewichtung erschien hier die Verwendung von zwei Rangstufen: Essentielle Forderungen wurden mit dem Faktor „2“ versehen. Dazu zählten Kriterien, die im Falle eines Nichterfülltseins die Akzeptanz der Lösung im Sinne der Anforderungen in Frage stellten und eine grundlegende Änderung des Lösungskonzepts erforderten. Um der wirtschaftlichen Bewertung Rechnung zu tragen, wurde ferner das Kriterium „Komplexität“ bei beiden Problemstellungen gewichtet.
Aus den gewichteten Einzelwerten errechnete man unter Einbeziehung der Standardabweichung einen Gesamtwert für jede Versuchsperson als Maß für die Lösungsgüte. Die Qualität der Konstruktion war um so höher, je höher der ermittelte Wert lag. Dieser Wert wurde prozentual in Relation zu einer gedachten Ideallösung (100 %) gesetzt.
Im Anhang A13 und A14 finden sich die Originalfassungen der Schemata zur Lösungsgütebewertung beider Problemstellungen.

Im Rahmen der Pilotstudie wurden beide Schemata an den erstellten Skizzen und CAD-Zeichnungen erprobt und im Bezug auf ihre Objektivität getestet, um daraufhin erkennbare Schwachstellen vor allem bezüglich der Verständlichkeit und Trennschärfe zu beseitigen. Um die Reproduzierbarkeit der Beurteilungsergebnisse abzusichern, bewertete eine Expertengruppe (N = 3) - davon ein praktisch tätiger Konstrukteur mit langjähriger Beurteilungserfahrung im Rahmen der Lehre, ein Student des Technischen Designs im achten Fachsemester sowie die Versuchsleiterin - die Entwürfe der Pilotstudie getrennt voneinander. Dabei stimmten die Urteiler im Bezug auf die jeweils gewählten Kategorien überein, so dass die Schemata als direkt validiert angesehen werden konnten. Die Urteilerübereinstimmung mittels gewichtetem Kappa lag für das Entwurfsproblem „Gartengrill“ durchschnittlich zwischen 89 und 95 %, für den Korkenzieher zwischen 88 und 92 %.

Bearbeitungszeit

Die Bearbeitungszeit umfasste die Zeit von der Darbietung der Problemstellung bis zum frei gewählten Zeitpunkt der Fertigstellung des Entwurfs entsprechend der Instruktion.

Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Da die Literatur zur Beurteilung der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts konstruktiver Entwürfe nahezu keine Aussagen macht, wurden zunächst Überlegungen angestellt, wie in Entwürfen enthaltene Informationen beschaffen sein können:

- nicht bzw. zu gering vorhanden
- mehrdeutig/widersprüchlich
- redundant/überbestimmt
- eindeutig.

Nicht bzw. in zu geringem Maß vorhandene ist ebenso wie mehrdeutige Information unbrauchbar für das Verständnis des vom Konstrukteur Intendierten. Redundanz, z. B. durch die bildliche Darstellung der Funktionssätze und die zusätzliche schriftliche Benennung der Elemente, kann unterstützende bis verwirrende Auswirkungen haben. So verhilft etwa die Wortmarke „Gewinde“ neben einem in einer CAD-Zeichnung normgerecht abgebildeten Gewinde einem Fachfremden zu der nötigen Information, da ihm aufgrund des fehlenden Fachwissens eine eindeutige Entschlüsselung der Darstellung nicht möglich ist. In diesem Fall ist eine Überbestimmung sinnvoll. Redundante Informationen bergen jedoch auch die Gefahr einer Informationsüberflutung und sorgen häufig für Verwirrung. Ihr Einsatz ist daher in der Regel nicht effektiv. Für die Unterstützung kooperativer Prozesse sollte eine prägnante und eindeutige Darstellung angestrebt werden.

Dem Schema zur Bewertung der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der von den Versuchspersonen in den frühen Phasen erzeugten Handskizzen und CAD-Zeichnungen lagen unabhängig von der Problemstellung folgende sechs Kriterien zugrunde, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben:

- Räumliche Anordnung der Teile zueinander
- Teile an sich
- Kinematik/Mechanik
- Notizen in Form von Icons (Pfeile, Maße etc.)
- Schriftliche Notizen (Wortmarken, Text etc.)
- Gesamtdarstellung.

Der Aspekt *Räumliche Anordnung der Teile zueinander* beschreibt die Lage der Teile zueinander. Beim zweiten Punkt wird die geometrische Abgrenzung der *Teile an sich* betrachtet. Das Zusammenspiel der einzelnen Teile im Sinne der Wirkung von Kräften und Bewegungen wird durch das Kriterium *Kinematik/Mechanik* näher beleuchtet. Die Dimension *Notizen* betrifft zum einen Maße und Icons, wie z. B. Pfeile, zum anderen auch schriftliche Notizen in Form von Wortmarken und Text. Das Kriterium *Gesamtdarstellung* bezieht sich auf die verständliche Darstellung des mittels Freihandskizzieren oder AutoCAD entworfenen Objekts als Ganzem im Sinne eines „ersten Eindrucks". Eventuell wird im Gesamtzusammenhang klar, was vom Entwerfenden wie gemeint ist, auch wenn andere Bewertungskriterien nicht eindeutig dargestellt sind.

Beim Entwurfsproblem „Gartengrill" ließ sich das zu konstruierende Objekt in zwei relativ klar abgrenzbare Teilbereiche gliedern, die getrennt voneinander bewertet wurden: den Mechanismus der Höhenverstellung und die Peripherie. Bei der Problemstellung „Korkenzieher" wurde aufgrund mangelnder Abgrenzbarkeit auf eine derartige Unterteilung verzichtet.
Der Entwurf bzw. seine beiden Teilbereiche wurden anhand der genannten sechs Kriterien hinsichtlich ihrer Eindeutigkeit jeweils entweder mit dem Wert „1" („eindeutig") oder „0" („nicht eindeutig") bewertet. Die Kriterien sind jedoch nicht vollständig unabhängig voneinander. Eine eindeutige Darstellung der beiden Aspekte „Räumliche Anordnung der Teile zueinander" sowie „Gesamtdarstellung" führt in der Regel bereits zu einer kommunizierbaren Lösung und erlaubt Aussagen zu den anderen Aspekten. Sie gingen deshalb mit dem Gewichtungsfaktor „2" in die Beurteilung ein, so dass maximal acht Punkte erreicht werden konnten.
Jedes Entwurfsergebnis wurde nach zwei Empfängergruppen getrennt bewertet, je nachdem ob es als Grundlage für die Kommunikation zwischen Fachleuten bzw. eines Konstrukteurs mit einem Fachfremden diente.

Zur Überprüfung der Objektivität des entwickelten Schemas bewerteten ein praktisch tätiger Konstrukteur und ein Student des Technischen Designs im achten Fachsemester die konstruktiven Entwürfe der Pilotstudie für die Empfängergruppe „Technischer Experte". Die Versuchsleiterin sowie eine weitere Psychologin schätzten die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts aus der Sicht eines Fachfremden ein. Die Beurteilungen wurden zunächst unabhängig voneinander einzeln vorgenommen. Dabei stimmten die Urteile für das Kategoriensystem überein, d. h., die Kategorien konnten im Sinne einer direkten Validierung als tauglich erachtet werden.

In einem weiteren Schritt wurde für jede Versuchsperson die Urteilerübereinstimmung mittels gewichtetem Kappa ermittelt. Diese lag beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ durchschnittlich bei 95 % (Höhenverstellung) bzw. 92 % (Peripherie) für die Empfängergruppe „Technischer Experte“ und bei 92 bzw. 95 % für die Empfängergruppe „Technischer Laie“. Beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ betrug die durchschnittliche Konkordanz der beiden Urteiler 81 und 92 %.

Anschließend wurden die Ergebnisse in den jeweiligen Zweiergruppen besprochen und nicht übereinstimmende Wertungen eingehend diskutiert. Durch Aufsummierung der gewichteten Einzelwerte errechnete man für jeden Teilnehmer der Pilotstudie je einen Gesamtwert als Maß für die Kommunizierbarkeit des Informationsgehalts seiner Lösung.

Das Schema zur Bewertung der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Entwurfsergebnisse kann im Anhang A15 eingesehen werden.

7.6.2.2 Variablen des Erlebens

Um konkrete Messwerte zu erhalten, sollten bedeutsame Kriterien des Erlebens durch den Probanden in Form von Ratings eingeschätzt werden.

Erlebte Problemschwierigkeit

Im Anschluss an die Bearbeitung der Problemstellung schätzte der Proband deren Schwierigkeit mittels einer sieben Zentimeter langen bipolaren Ratingskala mit den Polen 0: „sehr schwierig“ und 7: „überhaupt nicht schwierig“ ein (s. Anhang A11). Je größer der abgemessene Wert, desto weniger schwierig war das Entwurfsproblem vom Untersuchungsteilnehmer erlebt worden. Dieser hatte Gelegenheit, die vorgenommene Bewertung schriftlich zu kommentieren.

Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit

Die Sicherheit im Hinblick auf die Richtigkeit der entwickelten Lösung wurde ebenfalls im Anschluss an die Bearbeitung beurteilt. Dazu verwendete man eine sieben Zentimeter lange bipolare Ratingskala mit den Polen 0: „überhaupt nicht sicher“ und 7: „vollkommen sicher“ (s. Anhang A11). Je größer der abgemessene Wert, desto sicherer war sich der Proband hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit. Auch hier bot sich die Gelegenheit eines schriftlichen Kommentars.

Psychische Beanspruchung

Die Probanden füllten vor und nach der Bearbeitung der Problemstellung die Ratingskalen nach Plath et al. (1984) zum Beanspruchungserleben aus. Bei den 15 bipolaren Ratingskalen mit

Kennzeichnung der Extremwerte der Items (Range: 0 bis 7 cm) wurde dabei die Reihenfolge variiert, um Übertragungseffekte der vorherigen Einstufung zu vermeiden. Die Items bilden beanspruchungsrelevante Komponenten des Erlebens ab. Bei diesem Verfahren wird die psychische Beanspruchung durch die erlebten Veränderungen in vier Faktoren erfasst: dem psychophysischen Zustand, der Konzentration, der Motivation sowie der affektiven Lage. Die Werte für die erlebten Veränderungen bezüglich dieser Faktoren bestimmte man durch die Differenz aus Prä- und Posttestwerten. Je numerisch größer die Differenz, desto stärker war die negative Veränderung in diesem Bereich. Ein negativer Differenzwert sprach für eine positive Veränderung des Beanspruchungserlebens hinsichtlich dieses Faktors.
Dieses Verfahren hat sich in vielfältigen Labor- und Felduntersuchungen als valide und reliabel erwiesen. Sein Einsatz ist sehr zeitökonomisch und gilt als besonders vorteilhaft bei kurzdauernden Laborexperimenten (s. Plath et al., 1984).

7.6.2.3 Prozessvariablen

Die im folgenden dargestellten Kategorienschemata basieren auf der Annahme, dass sich die während eines Entwurfsprozesses ausgeführten Teiltätigkeiten und Schritte durch eine endliche Menge an Kategorien beschreiben lassen. Deren Auftretenshäufigkeit und Abfolge sollten Einblicke in eben diesen Prozess und in die mentalen Repräsentationen gewähren, die mit den aus dem Einsatz verschiedenartiger Arbeitsmittel resultierenden Vorgehensweisen verbunden sind. Die Kategorien fanden unabhängig von der experimentellen Bedingung Anwendung und galten sowohl für das Entwerfen durch Freihandskizzieren als auch für das rechnergestützte Entwerfen.

Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Der Handlungsvollzug wurde durch die konstruktionsbegleitende Dokumentation der Teiltätigkeiten einer Analyse zugänglich gemacht (vgl. z. B. Akin & Lin, 1996). Dazu wurden die beobachteten Teiltätigkeiten neun Kategorien zugeordnet (vgl. Tabelle 14), die bereits in vorangegangenen Untersuchungen erprobt worden waren (Römer, 2002; Schütze et al., 2001, 2003; Schütze, 2000). Zu ihrer Registrierung nutzte man neben Videoaufzeichnungen eine computergestützte Protokollierungstechnik.

Tab. 14: Teiltätigkeiten während der Lösungserarbeitung und ihre Operationalisierung

Teiltätigkeit	Beschreibung
• **Aufgabenstudium**	Lesen der Instruktion oder der Problemstellung, eventuell auch einer selbst aufgestellten Anforderungsliste
• **Skizzieren bzw. Zeichnen**	Skizzieren bzw. Zeichnen in rechtwinkliger Projektion, Beschriften der zeichnerischen Darstellung mit Maßzahlen
• **Notieren**	Unterstreichen, Anfertigen von schriftlichen Notizen, Aufschreiben von Anforderungen, Versehen von Bauteilen mit Wortmarken
• **Betrachten**	Betrachten der selbst erstellten Notizen, Skizze(n) bzw. Zeichnung(en)
• **Radieren bzw. Löschen**	Ausbesserungen in Form von Korrigieren oder Löschen in den Skizzen, Zeichnungen und erstellten Notizen
• **Keine sichtbare Aktivität**	Äußere Inaktivität ohne erkennbaren Verlust des Aufgabenbezugs durch den Probanden
• **Gestikulieren**	Gezielte Bewegungen mit Fingern, Händen, mit in der Hand gehaltenem Stift in der Luft bzw. auf dem Papier, mit der Maus auf dem Bildschirm (ohne zu zeichnen)
• **Sprechen**	Verbale Äußerungen

Das Protokollierungssystem ermöglichte durch eine Kodierung im Sekundenraster eine genaue Differenzierung von Ereigniszeiten und dadurch die Festlegung der exakten Abfolge von Teiltätigkeiten. Die Zeitmessung erfolgte bei diesem Programm automatisch. Den Ausschnitt eines solchen Protokolls zeigt die Abbildung 5:

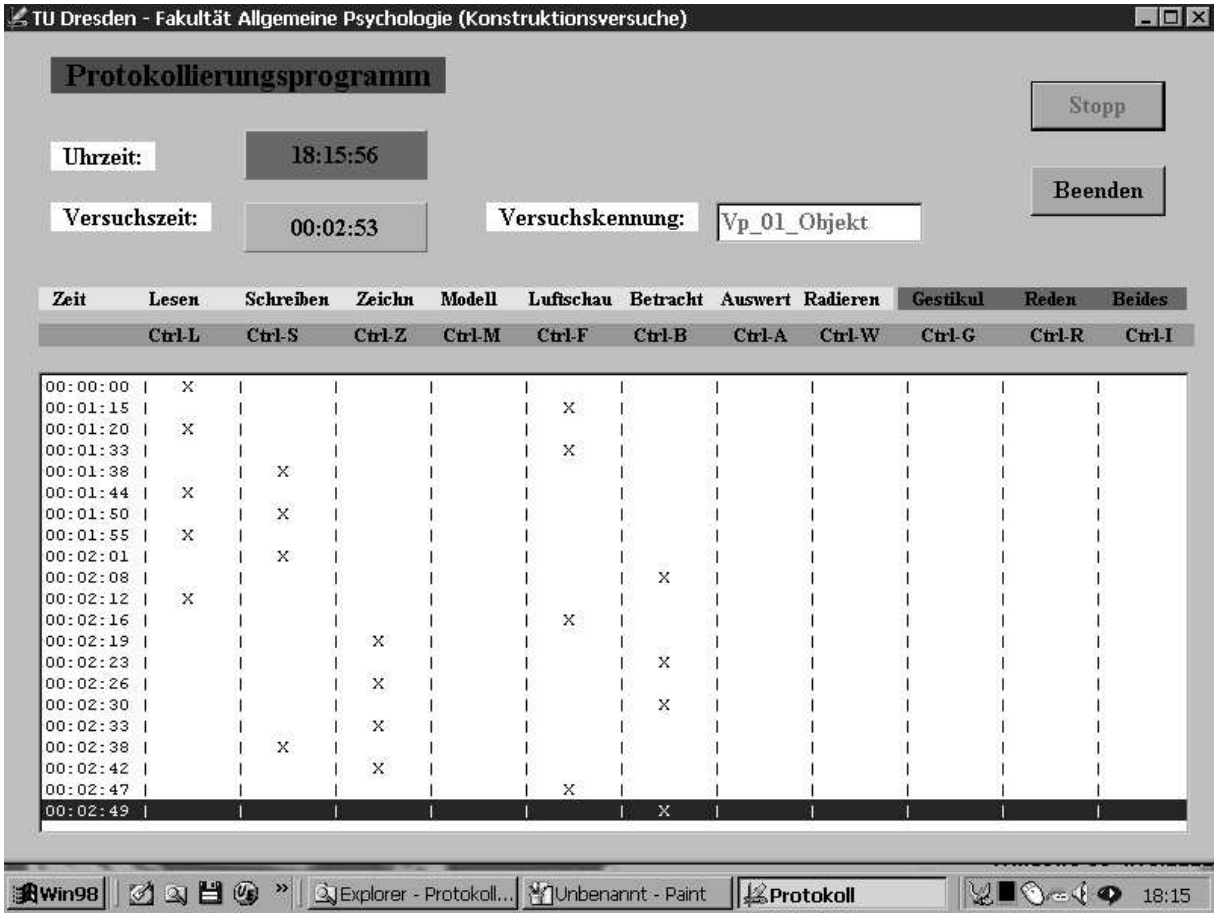


Abb. 5: Ausschnitt eines Protokolls zur Erfassung der Teiltätigkeiten

Nach Versuchsende wurde automatisch der genaue Prozentanteil der einzelnen Teiltätigkeiten an der Gesamtbearbeitungszeit berechnet. Die Teiltätigkeiten aus Tabelle 14 lassen sich in externe, materialisierende und interne, geistige trennen. Zu ersteren zählen das Skizzieren bzw. Zeichnen, das Notieren, das Radieren bzw. Löschen, das Gestikulieren und das Sprechen; letztere umfassen das Betrachten der Skizze bzw. Zeichnung sowie die äußere Inaktivität, während der ein Nachdenken des Probanden vermutet wird. Es interessierte die Anzahl der Wechsel zwischen externen und internen Teiltätigkeiten. Das Aufgabenstudium in Form des Lesens kann weder zu innerer, noch zu äußerer Bearbeitung gezählt werden und wurde deshalb als Ausgangspunkt für die Berechnung von Wechseln zu internen bzw. externen Teiltätigkeiten genutzt. Die Anzahl der Wechsel wurde vor der weiteren statistischen Verwendung im Bezug auf die vom Probanden benötigte Bearbeitungszeit relativiert. Bei den Teiltätigkeiten „Gestikulieren“ und „Sprechen“ registrierte man ausschließlich das Auftreten.

Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Im Mittelpunkt des Forschungsinteresses steht die Frage, ob sich Probanden, die verschiedenartige Arbeitsmittel im Rahmen der Lösungserarbeitung nutzen, neben den Ergebnissen auch in ihren Vorgehensweisen unterscheiden: Weshalb erzielen die Teilnehmer unterschiedlich hohe Werte für die Lösungsgüte? Was passiert in der von den Probanden benötigten Bearbeitungszeit? Diesen Fragen soll explorativ mit dem Ziel nachgegangen werden, die bisher gebräuchlichen Prozesskriterien zu erweitern, um dem Prozess des inneren Handelns näher zu kommen. Man ging davon aus, dass Erkenntnisse über die getätigten Entwurfsschritte im Sinne der Handlungsregulation am ehesten zur Erklärung anzunehmender Unterschiede zwischen den experimentellen Bedingungen bezüglich der Ergebnisvariablen „Lösungsgüte“ und „Bearbeitungszeit“ beitragen.

Im folgenden wird die Entwicklung des entsprechenden Kategorienschemas beschrieben und es werden Hinweise zur Datenerfassung gegeben. Zur Entwicklung eines geeigneten Kategorienschemas wurden die Videoaufzeichnungen aus der Pilotstudie nach skizzierenden und rechnergestützten Entwurfsprozessen getrennt mikroanalytisch betrachtet. Im Zweierteam zusammen mit einer Psychologin des Instituts für Allgemeine Psychologie, Biopsychologie und Methoden der Psychologie wurden die einzelnen, von den Probanden getätigten Schritte gezielt hinterfragt und im Hinblick auf relevante Auffälligkeiten diskutiert. Das Wesen bestimmter Schritte und deren konkrete Eigenschaften wurden oftmals erst im Bezug zu vorangegangenen bzw. nachfolgenden Schritten deutlich.

Dabei erwies sich die Problembearbeitung mit CAD als einfacher zu beurteilen und in der Folge auch auszuwerten, da sich hier die Analyseeinheiten durch die Notwendigkeit der regelmäßigen Funktionsbereitstellung mittels Tastatur oder Maus klarer voneinander abgrenzen ließen. In einem iterativen Prozess wurden zunächst für diese Versuchsbedingung die getätigten Schrittarten eindeutig definiert, mögliche Formen ihres Auftretens bestimmt und konkrete Beispiele mit entsprechenden Erläuterungen notiert.

Danach wurde das erstellte Kategorienschema hinsichtlich seiner Übertragbarkeit auf die skizzierende Vorgehensweise geprüft sowie entsprechend modifiziert und ergänzt. Folgende Schrittarten, die als kleinste Einheiten inhaltlich neue kognitive Leistungen definieren, haben sich nach eingehender Videoanalyse herauskristallisiert (s. Tabelle 15):

Tab. 15: Entwurfsschritte und ihre Operationalisierung

Schrittart	Beschreibung
• **Planung**	Keine „produzierende“ Handlungssequenz (Redefinition der Problemstellung, Ziel- bzw. Teilzielbildung)
• **Bereitstellung**	Basisschritt zur Bereitstellung verschiedener Funktionen etc. in Abhängigkeit vom Arbeitsmittel (Handlungsvorbereitung)
• **Generierung**	Stringentes Lösungsverhalten im Sinne des Umsetzens eines auf ein Teilziel bezogenen Plans (Handlungsausführung)
• **Kontrolle**	Ein „(Zwischen-)Produkt“ wird durch Messen und/oder (mentales) Testen überprüft (Handlungskontrolle)
• **Verwerfung**	Ein auf ein Teilziel bezogener Plan oder ein „gegenständliches“ Zwischenprodukt werden verworfen (aus Resultatsrückmeldung)
• **Anpassung**	Der Teil der Skizze/Zeichnung bleibt erhalten und wird an die Konstruktion angepasst (aus Resultatsrückmeldung)
• **Wiederholung**	Ein bereits vorhandener bzw. vorhanden gewesener Lösungsansatz wird nach Kontrolle oder Verwerfung wieder aufgegriffen (Resultatsrückmeldung und Wiederaufgreifen eines Ziels)

Unter den Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett“ gestaltete sich nicht die Bestimmung der Schrittart an sich als problematisch, sondern aufgrund der im Vergleich zu CAD nicht notwendigen, offensichtlichen Auswahl und Einstellung bestimmter Funktionen die eindeutige Abgrenzung der Schritte voneinander. So war zunächst unklar, wie ein mehrminütiges Generieren im Sinne des fortwährenden Skizzierens ohne zwischenzeitliche Schrittwechsel zu bewerten sei. Analyseeinheiten ergaben sich deshalb neben klar erkennbaren Schrittwechseln aus dem Wechsel in der Bearbeitung hin zu einem neuen Teilelement der Gesamtkonstruktion. Dazu wurden für beide Problemstellungen die zu konstruierenden Objekte jeweils in Teilelemente untergliedert: Der Gartengrill bestand aus Grillrost, Kohlepfanne, Gestell und dem Funktionsmechanismus der Höhenverstellung; der Korkenzieher wurde in Elemente bzw. Funktionalitäten zum Verankern des Geräts im Korken, zur Entnahme des Korkens aus der Flasche sowie in das Gehäuse zerlegt. Der Wechsel zu einem anderen Element der Konstruktion wurde als neuer Generierungsschritt gewertet.
Die während der Lösungserarbeitung ausgeführten Schritte wurden durch das Notieren des jeweiligen Anfangsbuchstabens über die Zeit der Bearbeitung - zur leichteren Bestimmung der Urteilerkonsistenz ereignisfraktioniert in Zeittakten von fünf Minuten - kodiert. Bei der sequentiellen Ausarbeitung mehrerer Varianten wurde nach Abschluss eines Entwurfs neu kodiert.

Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Anhand der produzierten Skizzen und Entwürfe ließ sich erkennen, ob der Proband bei der Erarbeitung der konstruktiven Haupt- und Nebenfunktionen generierend oder korrigierend vorgegangen war. Von Interesse beim generierenden Vorgehen war die Anzahl der gebildeten Alternativen, d. h., wie viele unterschiedliche (Teil-)Lösungen gleichzeitig in Betracht gezogen worden waren, bevor die Entscheidung für eine Lösungsmöglichkeit fiel. Die möglichen Variationen umfassten dabei sowohl das Hauptprinzip als auch Teilprinzipien: Es wurde unterschieden, ob eine neuentwickelte Variante auf einem andersartigen Funktionsprinzip im Vergleich zu der davor gefundenen Lösung basierte, oder ob lediglich ihre Gestalt (z. B. die Form des Grillrosts) variiert wurde.

Bei Untersuchungsteilnehmern mit einer korrigierenden Vorgehensweise wurde die Anzahl der im Laufe des Bearbeitungsprozesses nacheinander erzeugten Varianten erfasst.

Die Lösungsvarianten, die die Versuchspersonen geistig erzeugten, jedoch nicht aufzeichneten oder schriftlich niederlegten, konnten mittels der verwendeten Methoden nicht zuverlässig erfasst werden, so dass sie hier keine Berücksichtigung fanden. Zusätzlich zu den direkten Konstruktionsergebnissen in Form von Skizzen und CAD-Entwürfen wurden die Videoaufzeichnungen herangezogen, um den Lösungsprozess im Detail nachvollziehen zu können.

7.7 Versuchsablauf

Die Bearbeitung der beiden Entwurfsprobleme fand in Form von Einzelexperimenten zu zwei separaten Terminen statt. Für jeden Untersuchungstermin waren etwa 120 Minuten vorgesehen.

7.7.1 Erhebung von Personenvariablen

Nach der Begrüßung und Vorstellung erfolgte eine kurze Schilderung der Untersuchungsthematik und des Versuchsablaufs durch die Versuchsleiterin. Der Proband erhielt Informationen zum Datenschutz und zur anonymisierten Weiterverwendung des erhobenen Datenmaterials. Er wurde gebeten, schriftlich in die Videoaufzeichnung des Konstruktionsversuchs einzuwilligen.

Neben den wesentlichen demographischen Daten des Versuchsteilnehmers wurden auch qualifikationsbezogene Informationen wie Studienrichtung und Semesteranzahl, vorangegangene Lehre, absolvierte Praktika und Art und Umfang von Tätigkeiten im Konstruktionsbereich aufgenommen. Ferner interessierte eine Selbsteinschätzung der konstruktiven Fähigkeiten im allgemeinen auf einer Skala von 1 (= sehr gut) bis 5 (= mangelhaft).

Die Versuchsperson bearbeitete im Anschluss daran

a) die Kurzform des Dreidimensionalen Würfeltests (8 Items; Gittler, 1990) zur Erfassung der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung,
b) den Fragebogen zur psychischen Beanspruchung mit 15 bipolaren Ratingskalen (Plath et al., 1984), die beanspruchungsrelevante Komponenten des Erlebens abbilden, sowie
c) den Fragebogen mit vier Aussagen und je sieben Antwortkategorien, der die Erhebung des „Commitments“ zur Bearbeitung der darauffolgenden Problemstellung zum Ziel hatte.

7.7.2 Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung

Probanden, die vorab per Zufall bzw. durch Ausbalancierung dem Arbeitsmittel „Graphiktablett“ zugeordnet worden waren, wies die Versuchsleiterin zunächst in die Bedienung des Geräts ein. In einer ca. zehnminütigen Testphase hatten die Probanden Gelegenheit, die verschiedenen Funktionen zu testen und ein Gefühl für das Arbeiten auf der Bildschirmoberfläche zu bekommen.

Die Versuchsperson bekam eine kurze schriftliche Instruktion, die sie mit dem Kontext der Problemstellung und dem zu konstruierenden Objekt vertraut machte. Sie wurde instruiert, den Konstruktionsauftrag bis zum technischen Entwurf zu bearbeiten. Später würde sie der Kunde aufsuchen, um ihre ersten Arbeitsergebnisse zu besichtigen. Der Gartengrill sollte sowohl inhaltlich als auch zeichnerisch soweit festgelegt werden, dass das Prinzip der Konstruktion klar erkennbar ist, und diese beispielsweise auch von einem Kollegen entsprechend fertiggestellt werden könnte. Dazu musste der Proband abschätzen, ob seine Lösung funktioniert und alle im Konstruktionsauftrag genannten Anforderungen ausreichend konkretisiert sind.

Die Versuchsleiterin wiederholte danach die wesentlichen Punkte, um Missverständnissen vorzubeugen. Rückfragen bezüglich der Problemstellung waren jederzeit möglich.

Anschließend erhielt der Proband die an das zu konstruierende Objekt gestellten Anforderungen den frühen Phasen entsprechend als reduziertes, im Rahmen der Konstruktionspraxis übliches Pflichtenheft (Pahl & Beitz, 1993, 1997). Dieses konnte während der gesamten Bearbeitungsdauer eingesehen werden.

Eine zeitliche Begrenzung wurde bewusst nicht vorgegeben, um die Versuchsperson nicht unter Druck zu setzen. Die Person signalisierte die Fertigstellung zu einem frei gewählten Zeitpunkt. Sie präsentierte und erläuterte ihre Lösung verbal mit Hilfe der von ihr angefertigten Skizze(n) bzw. Zeichnung(en). Während der Präsentation an den Skizzen und Zeichnungen vorgenommene Änderungen erfolgten zur leichteren nachträglichen Identifizierung in Farbe.

Der Versuch wurde mit allen Handlungen und Äußerungen ab dem Erhalt des Konstruktionsauftrags auf Video aufgezeichnet (s. dazu Abschnitt 7.9).

7.7.3 Nachbefragungen

Im Anschluss an die Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung fand zunächst eine schriftliche Nachbefragung statt. Der Proband füllte erneut den Fragebogen zur psychischen Beanspruchung (Plath et al., 1984) aus. Ferner wurde er aufgefordert, die erlebte Problemschwierigkeit und seine Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit einzuschätzen.

Abschließend erfolgte eine weitestgehend standardisierte mündliche Befragung, in der der Proband zunächst sein Vorgehen schildern und daraufhin begründen sollte, warum er genau diese Lösung gewählt hatte. Generierte Alternativen wurden dabei aufgegriffen. Die Versuchsleiterin ermittelte die Vorkenntnisse zu dem vorliegenden Entwurfsproblem und stellte Fragen zur Unterstützung durch das genutzte Arbeitsmittel.

Die mündliche Nachbefragung wurde auf Band aufgezeichnet und anschließend vollständig transkribiert. Der Leitfaden für das strukturierte Interview findet sich im Anhang A12.

Der Ablauf der Pilotversuche lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Tab. 16: Versuchsablauf der Pilotstudie

		Zeit in Min.
Erhebung von Personenvariablen		
1.	Nur beim ersten Termin: Begrüßung und Vorstellung; Informationen zum Versuchsablauf und zum Datenschutz; Erhebung demographischer und qualifikationsbezogener Daten	10
2.	Nur beim ersten Termin: Kurzform des Dreidimensionalen Würfeltests (Gittler, 1990)	15 (max. 25)
3.	Fragebogen zur psychischen Beanspruchung (Plath et al., 1984)	3
4.	Fragebogen zur Motivation	2
Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung		
5.	Bei Bedingung „Graphiktablett“: Einführung und Testphase	(10)
6.	Erhalt der Instruktion und Bearbeitung des Konstruktionsauftrags	90 (max. 110)
Nachbefragungen		
7.	Fragebogen zur psychischen Beanspruchung (Plath et al., 1984)	3
8.	Schriftliche Nachbefragung zur erlebten Problemschwierigkeit und Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit	5
9.	Präsentation der konstruktiven Lösung	3
10.	Mündliche Nachbefragung	15

7.8 Methoden der Datenerfassung

7.8.1 Begründung der Erfassungsmethodik

Das Entwerfen wurde eingangs als ein komplexer Problemlöseprozess vorgestellt, der einige der höchsten kognitiven menschlichen Fähigkeiten erfordert. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Zugang zu den während der Entwurfstätigkeit ablaufenden Denkprozessen zu erlangen.

Eine empirische Forschungsmethode bei der Analyse der Entwurfsaktivität, die seit einigen Jahren mit dieser Zielstellung verstärkt Verwendung findet, ist die sog. „Protokollanalyse“ (Ericsson & Simon, 1993; Cross, Christiaans & Dorst, 1996a, b). Die Protokollanalyse ist vergleichbar mit der Methode des „lauten Denkens“ im Sinne Bühlers (1907), Claparèdes (1932) und Dunckers (1935), welche auch im deutschsprachigen Raum zur Untersuchung von Denkverläufen eingesetzt wird (z. B. Dörner, 1974; Franzen & Merz, 1976; Hesse, 1982; Dörner, Kreuzig, Reither & Stäudel, 1981; Spies & Hesse, 1987; Putz-Osterloh & Schroiff, 1987; Sonnentag, 1996).

Nach der Meinung mehrerer Autoren sind diese verbalen Protokolle über kognitive Aktivitäten aus mehreren Gründen kritisch einzuschätzen (z. B. Nisbett & Wilson, 1977; Kluwe, 1988; Weidle & Wagner, 1989; Knoblich & Rhenius, 1995; Lloyd, Lawson & Scott, 1996; Görner, 1994). Die erzwungene Verbalisierung bewirkt demzufolge eine Verlangsamung der Denkprozesse und eine Störung des Ablaufs. Mögliche Nebeneffekte sind etwa Veränderungen im Verhalten sowie Beeinträchtigungen in der kognitiven Leistung (z. B. Hanfer, 1957; Brunk, Collister, Swift & Stayton, 1958; Flaherty, 1974; Dwarakanath et al., 1996).

Ein problematischer Aspekt der Methode ist die Umsetzung von Gedanken, Empfindungen und Vorstellungen in Sprache. Entsprechend neurologischen Befunden sind die linke und die rechte Hemisphäre des Gehirns als Träger entgegengesetzter Funktionen (z. B. verbale Sprache vs. Seh- und Raumorientierungsfunktion) für unterschiedliche Aspekte des menschlichen Denkens verantwortlich (Beitz, 1996). Tovey (1986, 1992) postuliert die Zusammensetzung kreativer Prozesse aus zwei verschiedenen Arten des Denkens auch für den Entwurfsbereich. Demnach ist es bei konstruktiven Handlungen wie etwa dem Skizzieren extrem schwierig, gleichzeitig zu verbalisieren. Häufig lassen sich keine treffenden Formulierungen finden, und das Berichten der wirklichen Denkinhalte wird durch mangelnde Ausdrucksmöglichkeiten verhindert.

Gerade Probanden aus technischen Bereichen sind nicht an eine derartige Aufgabenbearbeitung gewöhnt, so dass vor der Versuchsdurchführung eine Einübung in das laute Denken stattfinden müsste. Ferner nimmt das Verbalisieren des Gedachten mehr Zeit in Anspruch als das Denken an sich. Hinzu kommt, dass sich der Proband unter dem sozialen Druck der Versuchssituation eventuell um eine besondere Ausdrucksweise im Sinne der sozialen Erwünschtheit bemüht.

Das gewichtigere Argument liegt aber im Wesen der hier untersuchten frühen Phasen, in denen die Denkinhalte in der Regel zu vage sind, als dass sie ausreichend verbal beschrieben werden könnten. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass gerade in diesem Stadium des Entwurfsprozesses nicht alle Kognitionen, die das Verhalten steuern, dem Bewusstsein zugänglich sind. Prozeduralisierte bzw. routinierte Tätigkeiten beruhen oftmals auf sog. „schweigenden", impliziten Wissen (tacit konowledge), das sich einer Verbalisierung entzieht (Hacker, 1994; Andreasen, 1994; Suwa et al., 1998): „It is a common notion amongst designers ... that if they could say what they were attempting to do they wouldn´t have to design/draw/compose it" (Lloyd et al., 1996). Schön (1992, 137) schreibt dazu unter besonderer Betonung der externalen Entwurfshandlung: „Design knowledge is knowing-in-action, revealed in and by actual designing. ... designers know more than they can say, tend to give inaccurate descriptions of what they know, and can best (or only) gain access to their knowing-in-action by putting themselves into the mode of doing" (vgl. auch Tovey, 1986; Suwa et al., 1998; Radcliffe, 1998).
Nach Claparède (1932) umfassen Bewusstseinsinhalte nur das, „was der Verstand zu tun beabsichtigt" oder „was er gerade getan hat" (zit. nach Weidle & Wagner, 1989, 88), also den Plan und das Ergebnis, nicht aber die eigentliche Ausführung der Denkhandlung. Auch gehen einem Konstrukteur in der komplexen Entwurfssituation sicherlich oftmals deutlich mehr Gedanken durch den Kopf, als er auszusprechen vermag. Dabei handelt es sich eventuell auch um von der aktuellen Tätigkeit unabhängige Gedanken. Hier kann es zu einer Konkurrenz um Verarbeitungskapazität und infolgedessen zu einem Auswahlproblem kommen. Dadurch wird unter Umständen das Problemlösen an sich behindert (Brown, 1984). Folglich ist anzunehmen, dass die verbale Wiedergabe vor allem in den frühen Entwurfsphasen unvollständig, irrelevant oder gar falsch ist: „Wenn sich das Denken in Sprechen verwandelt, strukturiert es sich um und verändert sich" (Wygotski, 1964, 303).
Aufgrund der Anzahl der aufgeführten Gründe für mögliche Validitätseinschränkungen durch die Methode des lauten Denkens stellt diese in der vorliegenden Arbeit kein geeignetes Mittel dar, um Erkenntnisse über das Denken von Entwerfenden zu gewinnen.

Die Rolle von Verbalisierungen im Entwurfsprozess ist noch nicht vollständig geklärt. Die Tätigkeit des Skizzierens bzw. Zeichnens sowie die dabei erzeugten Produkte in Form von Skizzen und Zeichnungen spielen hingegen ohne Zweifel eine Schlüsselrolle und sind für einen reibungslosen Entwurfsverlauf unerlässlich. Aufgrund der weitestgehend fehlenden beschreibenden, segmentierenden und interpretierenden Methoden (vgl. Görner, 1994) sollten in dieser Untersuchung auf der Grundlage der Einheit von Denken und Handeln Denkoperationen und -verläufe insbesondere aus den beim Skizzieren bzw. Zeichnen auftretenden Handlungsfolgen

erschlossen werden. Es wurde angestrebt, die Phasen der Aufgabenklärung, Konzeptfindung und des frühen Entwerfens hinsichtlich ihres inhaltlichen Verlaufs und der wesentlichen kognitiven Aktivitäten über die Beobachtung der Genese der dabei entstehenden Produkte zu erfassen.

Um Daten zu gewinnen, die die Beantwortung der interessierenden Fragestellungen zulassen, wurde ein systematischer Ansatz gewählt, der neben der Analyse der Ergebnisse der Entwurfshandlung und der Befragung des Bearbeiters zu seinem Vorgehen auch die Beobachtung der handelnden Person beinhaltete. Als zielgerichtete, methodisch kontrollierte und intersubjektiv überprüfbare Methode zeichnet sich die wissenschaftliche Beobachtung durch die Verwendung von Instrumenten aus, welche Selbstreflektiertheit, Systematik und Kontrolliertheit gewährleisten (Bortz & Döring, 1995). D. h., sie setzt in Abgrenzung zur Alltagsbeobachtung eine systematische Organisation in Form eines Beobachtungsplans voraus, der bestimmt, was wann wo in welcher Art und Weise zu protokollieren ist.
Im Rahmen dieser empirischen Laborstudie wurde eine nicht-teilnehmende, offene Fremdbeobachtung des Probanden gewählt. Die Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung wurde gleichzeitig auf Video aufgezeichnet und damit in Echtzeit abgebildet, um entscheidende Informationen ökonomisch und gleichzeitig vollständig zu erfassen. Dies erzeugte umfangreiches Datenmaterial und ermöglichte nachträglich eine detaillierte und objektive Analyse des Versuchsablaufs unter verschiedenen Gesichtspunkten. Da die Videoaufnahmen beliebig oft analysiert werden konnten, war die Auswertung der relevanten Ereignisse von der Versuchszeit unabhängig.

7.9 Untersuchungsanordnung

Die Versuche fanden in einem Labor statt, in dem eine störungsfreie Durchführung gewährleistet war. Um die Versuchsperson in ihren Handlungen nicht zu beeinträchtigen und eventuelle reaktive Effekte zu vermeiden, entschied man sich für die abgebildete Versuchsanordnung (s. Abbildung 6):

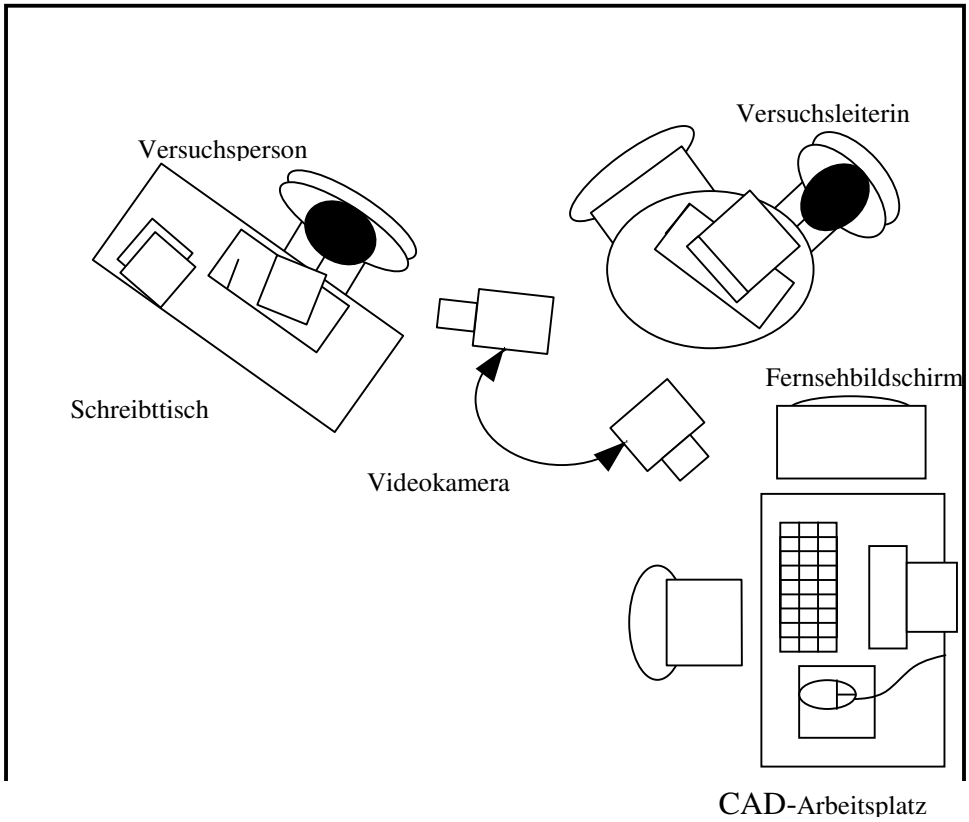


Abb. 6: Untersuchungsanordnung

Die Versuchsleiterin saß leicht schräg nach hinten versetzt mit einigem Abstand vom Probanden entfernt, so dass dieser beim Umherblicken die Versuchsleiterin nicht im Blickfeld hatte. Die Videokamera stand je nach Händigkeit links- oder rechtsseitig vom Probanden. Der Fortgang des Entwurfs konnte von der Versuchsleiterin auf einem zu ihr gerichteten Fernsehbildschirm verfolgt werden; gleichzeitig ließ diese Konstellation eine ungehinderte Beobachtung der Versuchsperson zu.
Es war davon ausgegangen worden, dass aufgrund der geforderten Zielstellung und der Bearbeitungsdauer eine Adaptation an die Situation eintritt, und die Beeinflussung oder Beanspruchung des Probanden durch diese Prozesserfassungsmethode daher minimal und für die drei Untersuchungsbedingungen gleich ist.

7.10 Strategien der Datenauswertung

Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs von N = 6 Probanden und der dreifach gestuften unabhängigen Variable waren die Daten der Pilotstudie einer statistischen Auswertung nicht zugänglich. Im folgenden werden die Ergebnisse für die erhobenen abhängigen Variablen nach

Problemstellungen getrennt deskriptiv dargestellt und anschließend zusammenfassend diskutiert.

7.11 Ergebnisse der experimentellen Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“

7.11.1 Homogenisierungsvariablen

7.11.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung

Beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ gab es bezüglich des „Commitments“ der Versuchsteilnehmer keine Unterschiede: Alle sechs Probanden waren mit Werten zwischen 6,0 und 7,0 überdurchschnittlich motiviert.

7.11.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung

Die Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung wurde mittels des Dreidimensionalen Würfeltests (Gittler, 1990) bei zwei Versuchsteilnehmern als unterdurchschnittlich und bei vier als überdurchschnittlich gemäß der entsprechenden Eichstichprobe eingestuft (s. Tabelle 17).

Tab. 17: Fähigkeit der Probanden zur räumlichen Vorstellung (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung
1	Rechnergestütztes Entwerfen (2D-CAD)	überdurchschnittlich
2	Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett (Graphiktablett)	unterdurchschnittlich
3	Graphiktablett	überdurchschnittlich
4	Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift (Papier und Bleistift)	überdurchschnittlich
5	Papier und Bleistift	überdurchschnittlich
6	2D-CAD	unterdurchschnittlich

7.11.2 Ergebnisvariablen

7.11.2.1 Lösungsgüte

Die Auswertung der Lösungsgüte der produzierten Entwürfe ergab beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ keine bemerkenswerten Unterschiede zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren auf Papier mit Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen (s. Tabelle 18). Sie

erzielten allesamt akzeptable Lösungen, wobei die Teilnehmer, die mit dem Graphiktablett arbeiteten, etwas besser abschnitten.

Die Gruppe der rechnergestützt Entwerfenden unterschied sich hingegen deutlich von der der Freihandskizzierenden. Die Lösung des Probanden 1 erfüllte zwei der drei Festforderungen nicht und wurde daher mit „0“ bewertet. Auch der Proband 6 erzielte mit 37,16 % einen beträchtlich geringeren Wert für die Lösungsgüte verglichen mit den Probanden 2 bis 5.

Tab. 18: Lösungsgüte der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Lösungsgüte** (in %)
1	2D-CAD	0
2	Graphiktablett	85,35
3	Graphiktablett	82,65
4	Papier und Bleistift	73,78
5	Papier und Bleistift	80,70
6	2D-CAD	37,16

7.11.2.2 Bearbeitungszeit

Bei der zur Bearbeitung der Problemstellung „Gartengrill“ benötigten Zeit zeigten sich keine auffälligen Unterschiede zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen (s. Tabelle 19). Sie signalisierten nach etwa einer Stunde die Fertigstellung der Lösung.

Die rechnergestützte Bearbeitung dauerte mit 87 bzw. 99 Minuten im Vergleich dazu etwa ein Drittel länger.

Tab. 19: Bearbeitungszeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Bearbeitungszeit** (in Min.)
1	2D-CAD	87
2	Graphiktablett	46
3	Graphiktablett	68
4	Papier und Bleistift	62
5	Papier und Bleistift	62
6	2D-CAD	99

7.11.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Hinsichtlich der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Entwürfe ergaben sich bei der Problemstellung „Gartengrill“ auch zwischen den Probanden einer Versuchsbedingung Unterschiede (s. Tabelle 20). Von denjenigen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, erzielte die Person 4 maximale Werte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts - sowohl im Hinblick auf die Kooperation mit technischen Laien als auch mit Experten. Die Werte der Versuchsperson 5 lagen hingegen für die Empfängergruppe „Laie“ im mittleren, für die der Experten eher im unteren Bereich.

Ein vergleichbares Ergebnis zeigte sich bei den Teilnehmern der anderen Versuchsbedingungen: Während der Proband 2, der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf, sowohl in der Laien- als auch der Expertenbeurteilung sehr gute Werte erzielte, galt der Entwurf des Probanden 3 hinsichtlich des Höhenverstellmechanismus für beide Empfängergruppen als nicht kommunizierbar und wurde auch bezüglich des Teilbereichs „Peripherie“ mit nur geringen Werten beurteilt.

Der mit AutoCAD erzeugte Entwurf des Probanden 1 wurde aus Laien- und Expertensicht als nicht kommunizierbar eingestuft. Der Proband 6 erzielte hingegen beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ mit diesem Arbeitsmittel Werte im unteren bis mittleren Bereich bezüglich der Kommunizierbarkeit.

Tab. 20: Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Laienbeurteilung		Expertenbeurteilung	
		Höhen-verstellung	Peripherie	Höhen-verstellung	Peripherie
1	2D-CAD	0	0	0	0
2	Graphiktablett	8	6	7	6
3	Graphiktablett	0	3	0	3
4	Papier und Bleistift	8	8	8	8
5	Papier und Bleistift	3	4	0	3
6	2D-CAD	2	4	2	4

7.11.3 Variablen des Erlebens

7.11.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit

Es zeigte sich, dass die beiden Probanden einer experimentellen Bedingung das Entwurfsproblem „Gartengrill“ jeweils als sehr unterschiedlich schwierig erlebten. Sowohl die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett Entwerfenden, als auch die

Versuchsteilnehmer, die rechnergestützt entwarfen, differierten im Paarvergleich erheblich (s. Tabelle 21).

Vergleicht man die vier Probanden untereinander, die die Problemstellung als weniger schwierig einstuften, so ließ sich zwischen den drei Versuchsbedingungen folgendes feststellen: Die durch Freihandskizzieren Entwerfenden 2 und 4 erlebten das Entwurfsproblem „Gartengrill" mit Werten von 6,7 bzw. 7,0 als überhaupt nicht schwierig. Dem mit Papier und Bleistift entwerfenden Teilnehmer 5 und dem rechnergestützt entwerfenden Probanden 1 erschien die Problemstellung mit Werten von 4,5 bzw. 5,0 als eher nicht schwierig. Die Probanden 3 und 6 hingegen erlebten die Problemstellung als deutlich schwieriger.

Tab. 21: Erlebte Problemschwierigkeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill")

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Erlebte Problemschwierigkeit** (0: sehr schwierig – 7: überhaupt nicht schwierig)
1	2D-CAD	5,0
2	Graphiktablett	6,7
3	Graphiktablett	2,1
4	Papier und Bleistift	7,0
5	Papier und Bleistift	4,5
6	2D-CAD	2,4

7.11.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit

Zwischen den Probanden der einzelnen experimentellen Bedingungen ließen sich keine deutlichen Unterschiede bezogen auf die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit ausmachen (s. Tabelle 22). Alle Probanden waren sich mit Werten von 4,5 bis 6,5 eher sicher bis sehr sicher.

Tab. 22: Sicherheit der Probanden hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill")

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Sicherheit** (0: überhaupt nicht sicher – 7: vollkommen sicher)
1	2D-CAD	4,5
2	Graphiktablett	6,5
3	Graphiktablett	4,6
4	Papier und Bleistift	5,7
5	Papier und Bleistift	4,7
6	2D-CAD	5,0

7.11.3.3 Psychische Beanspruchung

Das Beanspruchungserleben wurde vor und nach der Bearbeitung des Entwurfsproblems mittels der bipolaren Ratingskalen von Plath et al. (1984) erhoben, die erlebte Veränderungen des psychophysischen Zustands, der Konzentration, der Motivation sowie der affektiven Lage erfassen. Die Tabelle 23 zeigt die Differenzen aus Prä- und Posttestwert für die Problemstellung „Gartengrill".

Dabei zeigten sich bei den Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen, folgende Veränderungen: Der Proband 2, der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf, erlebte eine starke Beeinträchtigung der Motivation, des psychophysischen Zustands und der affektiven Lage. Bei den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden 3 und 5 zeigten sich Einbußen in der Motivation und der Konzentration nach Bearbeitung der konstruktiven Problemstellung. Die Versuchsperson 4, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarf, ließ keine nennenswerten Veränderungen erkennen.

Erhebliche Beeinträchtigungen in der Motivation und der Konzentration ergaben sich jeweils bei den rechnergestützt entwerfenden Versuchspersonen 1 und 6. Die Person 6 erlebte zudem eine starke Verschlechterung ihrer affektiven Lage.

Tab. 23: Psychische Beanspruchung der Probanden: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill")

Proband	Experimen-telleBedingung	Psychophysischer Zustand	Konzentration	Motivation	Affektive Lage
1	2D-CAD	0,2	1,4	2,4	0,7
2	Graphiktablett	1,8	0,1	2,4	1,7
3	Graphiktablett	0,7	1,1	1,4	-0,3
4	Papier und Bleistift	0,3	-0,35	0	0,2
5	Papier und Bleistift	0,4	1,35	2,2	0,4
6	2D-CAD	0,4	1,8	2,0	2,5

7.11.4 Prozessvariablen

7.11.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Bei den prozentualen Anteilen der Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit ergab sich hinsichtlich der unterschiedlichen experimentellen Bedingungen ein uneinheitliches Bild bei der Problemstellung „Gartengrill" (s. Tabelle 24). Die höchsten Prozentanteile erreichten bei allen Versuchsbedingungen die Teiltätigkeiten „Skizzieren bzw. Zeichnen" und „Betrachten".

Beim Vergleich dieser beiden Teiltätigkeiten ließ sich bei den durch Freihandskizzieren entwerfenden Teilnehmern 3 und 5 ein deutlich höherer Betrachtungsanteil ausmachen. Der Proband 4, der durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarf, skizzierte im Gegensatz dazu mehr; er machte sich jedoch verglichen mit den anderen Freihandskizzierenden kaum Notizen. Auffällig war der mit 31,5 % sehr hohe Schreibanteil bei dem durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwerfenden Probanden 3, der prozentual von allen Teilnehmern am wenigsten skizzierte.

Die rechnergestützt entwerfenden Probanden 1 und 6 machten beide während ihrer gesamten Bearbeitungszeit keine Notizen, wiesen aber hohe Werte bei der Teiltätigkeit „Zeichnen" auf. Bei der Versuchsperson 6 zeigte sich ein Ungleichgewicht der Teiltätigkeiten „Zeichnen" und „Betrachten" zugunsten des Zeichnens, das mit 53,5 % über die Hälfte der Bearbeitungszeit in Anspruch nahm. Die Prozentwerte für das Aufgabenstudium lagen etwas unter denen der durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden 2 bis 4.

Bezüglich der Teiltätigkeiten „Radieren bzw. Löschen" und „Keine sichtbare Aktivität" ließen sich keine offensichtlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Bedingungen ausmachen.

Tab. 24: Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Probanden an der Bearbeitungszeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill")

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Aufgaben-studium** (in %)	**Notieren** (in %)	**Skizzieren/ Zeichnen** (in %)	**Betrachten** (in %)	**Radieren/ Löschen** (in %)	**Keine sichtbare Aktivität** (in %)
1	2D-CAD	4,9	0	41,4	43,2	5,4	5,1
2	Graphiktablett	8,2	4,9	30,8	47,7	5,7	2,6
3	Graphiktablett	6,6	31,5	18,5	36,7	2,2	4,5
4	Papier und Bleistift	7,3	1,5	45,2	36,9	4,6	4,5
5	Papier und Bleistift	3,9	4,8	26,5	56,4	0,8	7,9
6	2D-CAD	4,7	0	53,5	33,5	2,3	6,0

Bis auf den mit AutoCAD entwerfenden Probanden 1 gestikulierten alle restlichen (83,3 %) bei der Lösungserarbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill". Es äußerte sich keiner der Teilnehmer verbal.

Hinsichtlich der Abfolgen der Teiltätigkeiten zeigten sich zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden bei den Wechseln „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit"

kaum Unterschiede (s. Tabelle 25): Ihre Anzahl erwies sich bei denjenigen, die den Gartengrill durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, mit je 1,9 Wechseln pro Stunde als identisch. Die Probanden der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ wechselten 2,6 bzw. 1,8 mal pro Stunde zwischen dem Lesen der Problemstellung und externen Teiltätigkeiten.

Im Vergleich dazu unterschieden sich die rechnergestützt Entwerfenden diesbezüglich mit 4,1 bzw. 0,6 Wechseln pro Stunde sowohl untereinander als auch von den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden.

Bei den Wechseln „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ ergab sich ein gegenteiliges Ergebnis: Die Teilnehmer der Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett“ unterschieden sich mit 1,9 und 4,8 bzw. 2,7 und 5,2 Wechseln pro Stunde stark innerhalb einer Bedingung. Dagegen wechselten die mit AutoCAD entwerfenden Personen mit 3,4 und 2,4 Wechseln pro Stunde vergleichbar häufig zwischen dem Lesen und internen Teiltätigkeiten.

Bezogen auf die Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“ war der Unterschied zwischen den beiden Probanden, die den Gartengrill durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, mit 193,0 und 82,1 Wechseln pro Stunde auffallend.

Verglichen mit der Gruppe der durch Freihandskizzieren Entwerfenden wechselten die Versuchspersonen, die rechnergestützt entwarfen, mit 44,1 und 56,4 Wechseln pro Stunde deutlich seltener zwischen externen und internen Teiltätigkeiten.

Tab. 25: Abfolgen der Teiltätigkeiten der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“** (pro Stunde)	**Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“** (pro Stunde)	**Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“** (pro Stunde)
1	2D-CAD	4,1	3,4	44,1
2	Graphiktablett	2,6	5,2	193,0
3	Graphiktablett	1,8	2,7	82,1
4	Papier und Bleistift	1,9	1,9	168,4
5	Papier und Bleistift	1,9	4,8	120,0
6	2D-CAD	0,6	2,4	56,4

7.11.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Im Rahmen der Pilotstudie wurde ein geeignetes Kategorienschema für die Erfassung der Entwurfsschritte entwickelt (s. Abschnitt 7.6.2.3). Die Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte wurden in einem Extremgruppenvergleich von Probanden der Hauptuntersuchung erfasst. Sie sind für die Problemstellung „Gartengrill“ im Abschnitt 8.8.4.2 dargestellt.

7.11.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Im Bezug auf die Lösungserzeugung zeigten die Probanden 3 und 4, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bzw. mit Papier und Bleistift entwarfen, bei der Problemstellung „Gartengrill“ ein generierendes Vorgehen (s. Tabelle 26). Der Proband 3 generierte beim Hauptprinzip zwei, der Proband 4 beim Hauptprinzip und bei Teilprinzipien insgesamt vier Lösungsvarianten, bevor sie sich für eine Möglichkeit entschieden und diese weiter verfolgten.
Der Versuchsteilnehmer 5 eröffnete korrigierend nacheinander drei mögliche Lösungen beim Hauptprinzip. Die anderen drei Teilnehmer, davon die beiden mit AutoCAD Entwerfenden, gingen ausschließlich korrigierend vor und betrachteten keine Alternativen.

Tab. 26: Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Lösungserzeugung	Anzahl der zu Beginn generierten Lösungsvarianten	Nacheinander, korrigierend entwickelte Lösungsvarianten
1	2D-CAD	korrigierend	1	-
2	Graphiktablett	korrigierend	1	-
3	Graphiktablett	generierend (beim Hauptprinzip)	3	-
4	Papier und Bleistift	generierend (beim Hauptprinzip und bei Teilprinzipien)	5	-
5	Papier und Bleistift	korrigierend	1	beim Hauptprinzip: 3
6	2D-CAD	korrigierend	1	-

7.12 Ergebnisse der experimentellen Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“

7.12.1 Homogenisierungsvariable „Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung“

Im Hinblick auf das Commitment konnten beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ keine Unterschiede zwischen den Teilnehmern der Pilotstudie festgestellt werden: Mit Werten zwischen 5,8 und 6,5 gaben alle eine überdurchschnittliche Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung an.

7.12.2 Ergebnisvariablen

7.12.2.1 Lösungsgüte

Die Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen, erzielten bei der Problemstellung „Korkenzieher“ insgesamt deutlich höhere Werte für die Güte der konstruktiven Lösung als die rechnergestützt Entwerfenden (s. Tabelle 27). Deren Lösungen wurden mit Werten unter 30 % im Vergleich zur Ideallösung als nicht akzeptabel eingestuft.

Die Entwürfe, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett erarbeitet worden waren, teilten sich pro Versuchsbedingung in einen Wert um 50 % und einen deutlich über 60 %, so dass sich auch innerhalb dieser Bedingungen Unterschiede im Hinblick auf die Wertigkeit der produzierten Lösungen feststellen ließen.

Tab. 27: Lösungsgüte der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Lösungsgüte** (in %)
1	Graphiktablett	64,85
2	2D-CAD	27,62
3	Papier und Bleistift	68,42
4	2D-CAD	25,37
5	Graphiktablett	50,21
6	Papier und Bleistift	51,0

7.12.2.2 Bearbeitungszeit

Die durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden 1, 3 und 6 unterschieden sich nicht in der Zeit, die sie zur Bearbeitung der Problemstellung „Korkenzieher“ benötigten: Ihre Bearbeitungszeit betrug etwas über 50 Minuten (s. Tabelle 28). Der Proband 4 hingegen, der das Entwurfsproblem durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett löste, hob sich mit 70 Minuten deut-

lich ab; er ließ sich im Bezug auf die Bearbeitungszeit eher mit den rechnergestützt Entwerfenden vergleichen. Diese benötigten 62 bzw. 80 Minuten bis zur Fertigstellung der Lösung.

Tab. 28: Bearbeitungszeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Bearbeitungszeit** (in Min.)
1	Graphiktablett	55
2	2D-CAD	80
3	Papier und Bleistift	54
4	2D-CAD	62
5	Graphiktablett	70
6	Papier und Bleistift	52

7.12.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ wurde aufgrund mangelnder Abgrenzbarkeit auf eine Unterteilung des Objekts in Teilbereiche verzichtet und der Entwurf im Gesamten bewertet.

Im Hinblick auf die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts an Fachfremde konnten bis auf die Lösung eines rechnergestützt entwerfenden Probanden alle Entwürfe mit Werten von 4 bis 6 als kommunizierbar eingestuft werden (s. Tabelle 29).

Der Proband 4 erfüllte sowohl aus der Sicht von Laien als auch von Experten keines der im Bewertungsschema genannten Kriterien, so dass sein Entwurf beide Male mit „0“ beurteilt wurde.

Aus Expertensicht wurden ausschließlich die Entwürfe der Probanden 3 und 5, die beide durch Freihandskizzieren entwarfen, mit Werten von 6 bzw. 4 als kommunizierbar beurteilt. Die Lösungen der durch Freihandskizzieren entwerfenden Teilnehmer 1 und 6 sowie der mit AutoCAD entwerfenden Personen 2 und 4 erwiesen sich unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel als nicht oder in unzureichendem Maße eindeutig bezüglich der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts.

Tab. 29: Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Laien-beurteilung	Experten-beurteilung
1	Graphiktablett	6	1
2	2D-CAD	4	2
3	Papier und Bleistift	6	6
4	2D-CAD	0	0
5	Graphiktablett	6	4
6	Papier und Bleistift	6	0

7.12.3 Variablen des Erlebens

7.12.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit

Die Problemstellung „Korkenzieher“ wurde von den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden mit Werten zwischen 1,9 und 2,9 durchweg als schwierig beurteilt (s. Tabelle 30). Die rechnergestützt entwerfenden Versuchsteilnehmer erlebten das Entwurfsproblem mit Werten von 3,5 bzw. 4,0 als weniger schwierig.

Tab. 30: Erlebte Problemschwierigkeit der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Erlebte Problemschwierigkeit (0: sehr schwierig – 7: überhaupt nicht schwierig)
1	Graphiktablett	2,4
2	2D-CAD	3,5
3	Papier mit Bleistift	1,9
4	2D-CAD	4,0
5	Graphiktablett	2,0
6	Papier mit Bleistift	2,9

7.12.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit

Sämtliche Werte für die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit lagen beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ in einem mittleren Bereich von 3,0 bis 5,0, d. h., es gab keinen Probanden, der sich überhaupt nicht oder vollkommen sicher war (s. Tabelle 31). Zwischen den einzelnen Untersuchungsbedingungen konnten keine deutlichen Unterschiede festgestellt werden.

Tab. 31: Sicherheit der Probanden hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Sicherheit (0: überhaupt nicht sicher – 7: vollkommen sicher)
1	Graphiktablett	4,7
2	2D-CAD	3,5
3	Papier mit Bleistift	4,1
4	2D-CAD	5,0
5	Graphiktablett	4,2
6	Papier mit Bleistift	3,0

7.12.3.3 Psychische Beanspruchung

Bei den durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsteilnehmern 1 und 6 zeigte sich das Beanspruchungserleben nach Bearbeitung des Entwurfsproblems „Korkenzieher“ bis auf eine leichte Verschlechterung des Konzentrationsvermögens nahezu unverändert (s. Tabelle 32). Eine Verbesserung der Befindensausprägung in allen vier Faktoren wies der Proband 3 auf, der durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarf. Der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwerfende Proband 5 hatte deutliche Einbußen in der Konzentration und etwas weniger stark bezüglich seines psychophysischen Zustands erlebt.

Die Teilnehmer 2 und 4, die die Problemstellung „Korkenzieher“ rechnergestützt bearbeiteten, erlebten beide eine starke Beeinträchtigung des psychophysischen Zustands. Zusätzlich ergaben sich beim Probanden 2 nach der Problembearbeitung Einschränkungen bezüglich der Konzentration und eine extreme Verschlechterung seiner affektiven Lage.

Tab. 32: Psychische Beanspruchung der Probanden: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Psychophysischer Zustand	Konzentration	Motivation	Affektive Lage
1	Graphiktablett	0,4	0,65	0,2	0,3
2	2D-CAD	1,6	1,15	0,8	2,9
3	Papier und Bleistift	-0,1	-0,45	-0,9	-0,3
4	2D-CAD	1,3	0,25	0,1	0,4
5	Graphiktablett	0,8	1,45	0,5	-0,6
6	Papier und Bleistift	-0,4	0,55	0,5	0,5

7.12.4 Prozessvariablen

7.12.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Die prozentualen Anteile der Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit ergaben auch innerhalb der einzelnen Versuchsbedingungen teilweise deutliche Unterschiede (s. Tabelle 33).

Der Proband 3, der durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarf, notierte mit einem Anteil von 17 % am meisten und wies ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Teiltätigkeiten „Skizzieren“ und „Betrachten“ auf. Im Gegensatz dazu notierte der Proband 6 nichts, skizzierte aber bei nahezu identischem Betrachtungsanteil mit 51,5 % deutlich mehr.

Auffällig war der mit knapp 18 % sehr geringe Skizzieranteil des Untersuchungsteilnehmers 1, der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf. Er schrieb dagegen viel, betrachtete etwa die Hälfte der Bearbeitungszeit die erzeugten Skizzen und zeigte mit einem Anteil von fast 10 % keine sichtbare Aktivität. Der Betrachtungsanteil des Probanden 5 war vergleichbar, allerdings notierte dieser weniger und skizzierte mehr.

Die rechnergestützt entwerfenden Probanden 2 und 4 notierten nahezu nichts bzw. nichts. Der Proband 2 zeigte im Bezug auf die beiden Teiltätigkeiten „Zeichnen“ und „Betrachten“ mit fast 53 % einen erhöhten Betrachtungsanteil, die Versuchsperson 4 mit über 50 % einen erhöhten Zeichenanteil. Sie löschte im Vergleich zu allen anderen Teilnehmern der Pilotstudie deutlich länger.

Tab. 33: Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Probanden an der Bearbeitungszeit (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Aufgaben-studium** (in %)	**Notieren** (in %)	**Skizzieren/ Zeichnen** (in %)	**Betrachten** (in %)	**Radieren/ Löschen** (in %)	**Keine sichtbare Aktivität** (in %)
1	Graphiktablett	4,9	12,9	17,6	50,5	4,2	9,9
2	2D-CAD	3,7	0,8	38,3	52,9	2,2	2,1
3	Papier und Bleistift	4,8	17,0	35,0	38,7	2,7	1,7
4	2D-CAD	5,1	0	50,4	35,4	8,4	0,6
5	Graphiktablett	2,9	5,7	30,4	52,7	1,5	6,9
6	Papier und Bleistift	2,4	0,1	51,5	39,5	4,0	2,4

Bei der Problemstellung „Korkenzieher“ gestikulierten fünf der sechs Teilnehmer (83,3 %). Der nichtgestikulierende Proband 1 entwarf das Objekt durch Freihandskizzieren mit Gra-

phiktablett. Zwei Probanden (33,3 %) äußerten sich während der Lösungserarbeitung verbal. Sie entwarfen beide durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift.

Bezogen auf die Abfolgen der Teiltätigkeiten ließen sich hinsichtlich der Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ vor allem bei den beiden Probanden, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, extreme Abweichungen feststellen: Während der Proband 6 keine Wechsel zwischen dem Lesen der Problemstellung und externen Teiltätigkeiten aufwies, wechselte der Proband 3 hier 36,9 mal pro Stunde (s. Tabelle 34).
Die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwerfenden Teilnehmer unterschieden sich diesbezüglich mit 2,2 und 0,9 Wechseln pro Stunde weniger voneinander; ebenso wie die rechnergestützt Entwerfenden, die mit 0,8 und 0,7 Wechseln pro Stunde ein nahezu identisches Ergebnis lieferten.
Bei den Wechseln „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ ergaben sich mit Ausnahme der mit AutoCAD entwerfenden Versuchspersonen 2 und 4 mit 3,0 und 0,7 Wechseln pro Stunde keine nennenswerten Unterschiede – weder innerhalb einer, noch zwischen den einzelnen Untersuchungsbedingungen.
Auch bei den Wechseln „Externe – interne Teiltätigkeiten“ zeigten sich keine Auffälligkeiten zwischen den Probanden einer Bedingung. Die Teilnehmer, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, wechselten mit 194,4 und 240,0 Wechseln pro Stunde häufiger zwischen externen und internen Teiltätigkeiten als die Teilnehmer der anderen beiden experimentellen Bedingungen.

Tab. 34: Abfolgen der Teiltätigkeiten der Probanden (N = 6; Pilotstudie: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	**Experimentelle Bedingung**	**Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“** (pro Stunde)	**Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“** (pro Stunde)	**Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“** (pro Stunde)
1	Graphiktablett	2,2	1,1	116,7
2	2D-CAD	0,8	3,0	116,3
3	Papier und Bleistift	36,9	2,2	194,4
4	2D-CAD	0,7	0,7	91,4
5	Graphiktablett	0,9	2,6	121,7
6	Papier und Bleistift	0	1,2	240,0

7.12.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Die Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte erfasste man in einem Extremgruppenvergleich von Probanden der Hauptuntersuchung mit Hilfe des im Rahmen der Pilotstudie entwickelten Kategorienschemas (s. Abschnitt 7.6.2.3). Die entsprechende Darstellung findet sich im Abschnitt 8.10.4.2.

7.12.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Bei der Lösungserzeugung des Korkenziehers gingen zwei der durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden generierend vor. Dabei erstellte der Proband 3 drei, der Proband 5 vier Varianten beim Hauptprinzip.

Der Proband 2, der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf, entwickelte korrigierend nacheinander zwei Lösungsvarianten beim Hauptprinzip.

Die beiden rechnergestützt Entwerfenden sowie der Proband 6 zeigten ein rein korrigierendes Vorgehen.

Tab. 35: Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen der Probanden (N = 6; Pilotstudie : Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Proband	Experimentelle Bedingung	Lösungserzeugung	Anzahl der zu Beginn generierten Lösungsvarianten	Nacheinander, korrigierend entwickelte Lösungsvarianten
1	Graphiktablett	korrigierend	1	beim Hauptprinzip: 2
2	2D-CAD	korrigierend	1	-
3	Papier und Bleistift	generierend (beim Hauptprinzip)	3	-
4	2D-CAD	korrigierend	1	-
5	Graphiktablett	generierend (beim Hauptprinzip)	4	-
6	Papier und Bleistift	korrigierend	1	-

7.13 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die experimentelle Hauptuntersuchung

Da die Stichprobengröße der experimentellen Pilotstudie für eine statistische Auswertung nicht ausreichend war, und die Ergebnisdarstellung daher rein deskriptiv erfolgte, sollen im folgenden die Ergebnisse beider Entwurfsprobleme in Form einer Gegenüberstellung diskutiert werden. Zum einen gibt die gemeinsame Diskussion Aufschluss über die Tauglichkeit beider Problemstellungen, zum anderen lassen sich aus diesem Überblick Schlussfolgerungen für die Fragestellungen und Hypothesen sowie die Methodik der experimentellen Hauptuntersuchung ableiten.

Alle sechs Teilnehmer gaben sowohl zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill“ als auch des Korkenziehers eine überdurchschnittliche Motivation an.

Hinsichtlich der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung zeigte sich unabhängig von der experimentellen Bedingung zweimal eine unterdurchschnittliche und viermal eine überdurchschnittliche Ausprägung. Dieses Ergebnis lässt auf ein Spektrum verschiedener Ausprägungen in der Stichprobe der Hauptuntersuchung schließen. Beide Variablen sollen in der Hauptuntersuchung zum Zweck einer zusätzlichen Homogenisierung erhoben werden.

Im Bereich der Ergebnisse zeigte sich bei den Probanden der Pilotstudie zusammenfassend das folgende Bild: Bezüglich der Variable „Lösungsgüte“ ergaben sich beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ deutliche Unterschiede zwischen den durch Freihandskizzieren und den rechnergestützt Entwerfenden. Während erstere durchweg akzeptable Werte für die Güte der konstruktiven Lösung erreichten, erzielte einer der mit AutoCAD entwerfenden Probanden eine auffallend geringe Lösungsgüte; der andere scheiterte bereits an der Erfüllung der Festforderungen.

Ein vergleichbares Bild bot sich bei der Problemstellung „Korkenzieher“: Auch hier waren die rechnergestützt erarbeiteten Lösungen bedeutend geringer hinsichtlich ihrer Güte bewertet worden. Im Vergleich zur ersten Problemstellung erreichten die Probanden insgesamt geringere Prozentwerte für die Lösungsgüte. Das bedeutet, die Qualität der Erfüllung der gestellten Forderungen war insgesamt geringer. Auch unterschieden sich hier jeweils die beiden durch Freihandskizzieren mit den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ entwerfenden Teilnehmer innerhalb einer Bedingung voneinander. Dies deutet zum einen darauf hin, dass die Anforderungsstruktur des Entwurfsproblems „Korkenzieher“ für die Probanden der Pilotstudie komplizierter war. Zum anderen haben sich die Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ als vergleichbar dienlich bei der Lösungserarbeitung beider Problemstellungen erwiesen.

Betrachtet man die Ergebnisse zur Lösungsgüte im Gesamtzusammenhang, so lässt sich weder mit der Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung noch mit der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung eine Verbindung ausmachen. Dieses Resultat stützt die Nutzung dieser beiden Variablen zu einer weiteren Homogenisierung der Stichprobe der Hauptuntersuchung.

Die zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill" benötigte Zeit differierte sehr stark zwischen den durch Freihandskizzieren und den rechnergestützt entwerfenden Probanden. Die Probandenpaare, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen, unterschieden sich nicht voneinander. Die Teilnehmer, die mit AutoCAD entwarfen, benötigten deutlich mehr Bearbeitungszeit.
Mit Ausnahme eines Probanden, der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf und ähnlich viel Zeit wie die rechnergestützt Entwerfenden brauchte, ließen sich diese Ergebnisse mit einem geringeren Unterschied bei der Problemstellung „Korkenzieher" wiederholen.
Beide Problemstellungen konnten von allen Teilnehmern der Pilotstudie in dem dafür vorgesehenen Zeitrahmen bis zum technischen Entwurf fertig bearbeitet werden. Insgesamt benötigten die Probanden beim Entwurfsproblem „Korkenzieher" etwas weniger Zeit zur Bearbeitung. In Kombination mit den durchschnittlich geringeren Werten für die Lösungsgüte lässt sich schlussfolgern, dass diese Problemstellung weniger eingehend bearbeitet wurde. Als Grund wäre z. B. ein sich vom Entwurfsproblem „Gartengrill" unterscheidender Komplexitätsgrad denkbar. Eventuell haben die Probanden auch mehr Erfahrung im Umgang mit Grillgeräten, was ein Durchdenken verschiedener Teillösungen erforderlich gemacht, und damit die Bearbeitungszeit verlängert hat. Zusammenfassend konnten zwischen den erreichten Werten für die essentiellen Ergebnisvariablen „Lösungsgüte" und „Bearbeitungszeit" bei beiden Problemstellungen keine bedeutsamen Beziehungen gefunden werden.

Im Hinblick auf die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts wurden die mit dem gleichen Arbeitsmittel erzeugten Entwürfe des Gartengrills unterschiedlich bewertet. Bei den experimentellen Bedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett" erzielte jeweils ein Proband hohe bis sehr hohe Werte für die Kommunizierbarkeit, der andere eher sehr geringe bis mittlere. Bei dem rechnergestützt entwerfenden Probandenpaar existierte dieser Unterschied auf einer tieferen Ebene: Während eine Person Werte im geringen bis mittleren Bereich erreichte, galt der andere Entwurf als nicht kommunizierbar. Bemerkenswerte Unterschiede zwischen der Laien- und Expertenbeurteilung existierten nicht, das bedeutet, die Teilbereiche „Höhenverstellung" und „Peripherie" wurden von beiden Gruppen vergleichbar bewertet.

Die von Freihandskizzierenden erstellten Entwürfe des Korkenziehers wurden aus der Sicht der technischen Laien allesamt als gut kommunizierbar eingestuft. Die Expertenurteile wichen davon mit einer Ausnahme mäßig bis sehr stark ab, insofern, dass die Experten dieselben Entwürfe als schlechter bzw. nicht ausreichend kommunizierbar einstuften. Von den rechnergestützten Entwürfen wurde einer sowohl aus der Sicht von Laien als auch von Experten als völlig unzureichend bewertet, der andere erzielte einen mittleren bzw. geringen Wert für seine Kommunizierbarkeit.
Insgesamt lassen sich an den Ergebnissen der Pilotstudie zur Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts sehr unterschiedliche Wertigkeiten der mit dem gleichen Arbeitsmittel erstellten Entwürfe erkennen. Zwei der mit AutoCAD erstellten Entwürfe wurden als völlig unzureichend eingestuft, was auf eine generell schlechtere Kommunizierbarkeit im Vergleich zu Entwürfen, die durch Freihandskizzieren erstellt wurden, hindeutet. Die ferner auffallenden Unterschiede in der Bewertung desselben Entwurfs durch technische Laien bzw. Experten weisen auf die verschiedenartigen Anforderungen dieser beiden Gruppen an eine Darstellung hin.

Die Variablen des Erlebens gestalteten sich bei den Teilnehmern der Pilotstudie wie folgt: Bezogen auf die erlebte Problemschwierigkeit konnte man beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ keine klare Tendenz ausmachen. Insgesamt erlebten je zwei Teilnehmer die Problemstellung als eher schwierig, mittelmäßig schwierig und überhaupt nicht schwierig. Die beiden Probanden, die mit dem gleichen Arbeitsmittel entwarfen, differierten dabei in ihrer Einschätzung.
Das Entwurfsproblem „Korkenzieher“ wurde hingegen von den durch Freihandskizzieren Entwerfenden durchweg als eher schwierig eingestuft, während die rechnergestützt entwerfenden Probanden die Problemstellung als mittelmäßig bzw. eher weniger schwierig empfanden. Dieses Resultat kann als das entscheidendere im Hinblick auf eine Interpretationsgrundlage angesehen werden, da die Probanden bei der Einschätzung der Schwierigkeit der Problemstellung „Korkenzieher“ die Problemstellung „Gartengrill“ als Vergleichmöglichkeit zur Verfügung hatten. Beide mit AutoCAD entwerfenden Personen erzielten gleichzeitig einen deutlich geringeren Wert für die Güte der konstruktiven Lösung. Somit liegt die Vermutung nahe, dass die neben der Bedienung des Programms AutoCAD verbleibende mentale Kapazität nicht ausgereicht hat, um das Problem in seiner Gesamtheit zu verstehen und vorwiegend mental zu behandeln. Stattdessen kam es im Sinne der kognitiven Ökonomie zu einer Vereinfachung des Entwurfsproblems (vgl. Abschnitt 2.2.1).
Zusammenfassend wurden beide Problemstellungen im Hinblick auf ihren Schwierigkeitsgrad jeweils unterschiedlich von den Bearbeitern wahrgenommen und es waren nahezu sämtliche Beurteilungen vertreten. Die bei beiden Entwurfsproblemen gleichartig vorhandene Bewer-

tungsspannweite stützt die im Abschnitt 7.4.2 geschilderten Ergebnisse zu deren Anforderungsstruktur und spricht für einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad. Dies darf als ein Hinweis auf die Eignung der Problemstellungen für die experimentelle Hauptuntersuchung verstanden werden.

Bei der Einschätzung der Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit ergaben sich weder beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ noch beim Korkenzieher offensichtliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Arbeitsmittel. Die Probanden waren sich hinsichtlich der Richtigkeit ihrer Lösung unabhängig von der Problemstellung mindestens durchschnittlich sicher. Bei der ersten Problemstellung lag der Wertebereich etwas höher, d. h., die Sicherheit wurde als größer empfunden.
Auch dieses Ergebnis spricht für einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad beider Problemstellungen und damit für ihre Verwendbarkeit im Rahmen der Hauptuntersuchung.

Mit Ausnahme eines durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwerfenden Probanden, der keine nennenswerten Veränderungen im Beanspruchungserleben nach der Bearbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill“ erkennen ließ, zeigten sich hier vor allem beim Faktor „Motivation“ starke Beeinträchtigungen bei allen anderen Teilnehmern unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel. Vor allem die rechnergestützt entwerfenden Versuchspersonen erlebten zudem eine deutliche Verschlechterung ihres Konzentrationsvermögens. Eine negative Veränderung des psychophysischen Zustands betraf verstärkt die beiden Personen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen. Die affektive Lage verschlechterte sich nach der Problembearbeitung bei einem durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett sowie bei beiden mit AutoCAD entwerfenden Probanden, bei einem davon erheblich.
Nach der Bearbeitung der Problemstellung „Korkenzieher“ war der Zustand der psychischen Beanspruchung bei zwei der durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden bis auf eine leichte Verschlechterung des Konzentrationsvermögens nahezu unverändert. Bei einem durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwerfenden Probanden verbesserte er sich sogar. Nur ein Teilnehmer, der durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf, wies verstärkte Einbußen in der Konzentration sowie der affektiven Lage auf. Die Versuchspersonen, die rechnergestützt entwarfen, erlebten beide eine starke Beeinträchtigung des psychophysischen Zustands. Einer davon gab zudem eine Verschlechterung der Konzentration, Motivation und in extremer Weiser der affektiven Lage an.
Zusammenfassend erlebten vor allem die rechnergestützt entwerfenden Probanden bei beiden Problemstellungen Beeinträchtigungen in der psychischen Beanspruchung, wohingegen die

durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwerfenden Personen eher geringere Veränderungen aufwiesen.

Im Bereich des Prozesses lässt sich bei der Pilotstudie folgendes festhalten: Bezogen auf die ausgeführten Tätigkeiten erreichten unter allen drei experimentellen Bedingungen die Teiltätigkeiten „Skizzieren bzw. Zeichnen“ und „Betrachten“ bei beiden Problemstellungen die höchsten prozentualen Anteile. Diese wechselten bei den einzelnen Versuchspersonen unabhängig vom genutzten Arbeitsmittel im Verhältnis zueinander. Auffallend sowohl beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ als auch beim Korkenzieher war die eingeschränkte Schreibtätigkeit der rechnergestützt entwerfenden Teilnehmer. Von den durch Freihandskizzieren Entwerfenden notierten insgesamt drei Personen viel bis sehr viel, die restlichen eher wenig. Bezogen auf die anderen Teiltätigkeiten zeigten sich keine Auffälligkeiten, die auf die Nutzung unterschiedlicher Arbeitsmittel zurückzuführen wären.
Im Hinblick auf die Abfolge der Teiltätigkeiten in Form der verschiedenen Wechsel ließen sich weder zwischen den Probanden einer Versuchsbedingung noch zwischen den drei Bedingungen Parallelen bei den beiden Problemstellungen finden. Sowohl beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ als auch beim „Korkenzieher“ wurde am häufigsten zwischen externen und internen Teiltätigkeiten gewechselt.
Damit lässt sich zusammenfassen: Die hohen prozentualen Anteile der Teiltätigkeiten „Skizzieren bzw. Zeichnen“ und „Betrachten“ weisen diese als Haupttätigkeiten in den frühen Entwurfsabschnitten aus. Die Tatsache, dass zwischen externen und internen Teiltätigkeiten durchgängig die meisten Wechsel stattfanden, spricht für die bedeutende Rolle der Wechselwirkungen von internalem und externalem Handeln beim Entwerfen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Diesbezügliche arbeitsmittelbedingte Unterschiede lassen sich aus den Ergebnissen der experimentellen Pilotstudie nicht ableiten. Sie bedürfen einer vertieften Betrachtung anhand einer größeren Stichprobe in der Hauptuntersuchung.

Im Hinblick auf die Lösungserzeugung deckten sich die Ergebnisse beider Problemstellungen weitestgehend: Jeweils einer der Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen, generierte zu Beginn mehrere Lösungen beim Hauptprinzip bzw. beim Hauptprinzip und bei Teilprinzipien. Ein weiterer durch Freihandskizzieren entwerfender Teilnehmer ging jeweils ausschließlich korrigierend vor; einer entwickelte nacheinander korrigierend mindestens zwei Lösungsvarianten. Die rechnergestützt entwerfenden Probanden zeigten sowohl bei der Problemstellung „Gartengrill“ als auch beim Korkenzieher ein rein korrigierendes Vorgehen.

Dies deutet auf gravierende Einschränkungen der Variantenbildung durch das Arbeitsmittel „AutoCAD“ hin. Das Freihandskizzieren hingegen scheint in den frühen Phasen des Entwerfens kreative Prozesse eher anzuregen und zu fördern. Auch dieser Vermutung muss im Rahmen einer Untersuchung mit einer größeren Stichprobe nachgegangen werden.

8 Experimentelle Hauptuntersuchung: Unterstützungspotential der Arbeitsmittel und Replikation der Ergebnisse

8.1 Zielstellungen

(1) Aufgrund der theoretisch begründeten Erwartungen sowie der in der Pilotstudie gefundenen Unterschiede soll nun anhand einer experimentellen Laboruntersuchung bei der Problemstellung „Gartengrill“ geprüft werden, ob sich beim Einsatz der verschiedenartigen Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsphasen statistisch bedeutsame Unterschiede in den unterschiedlichen Bewertungsbereichen nachweisen lassen. Die in diese Analysen im Bereich des Prozesses einbezogene Variable „Entwurfsschritte“ dient dazu, die Erfolgskriterien aus handlungstheoretischer Sicht zu erweitern.
(2) Unter der Voraussetzung, dass sich solche Unterschiede zeigen lassen, sollen die Ergebnisse in einem zweiten Schritt an der anforderungsähnlichen Problemstellung „Korkenzieher“ auf Replizierbarkeit getestet werden.
(3) Abschließend sollen die Ergebnisse als Grundlage für das effektive und effiziente Auslegen von Eingabe- und Verarbeitungstechniken zukünftiger CAD-Systeme im Sinne einer geschlossenen Informationskette dienen. Ziel ist es, konkrete Kriterien für die optimale Beschaffenheit digitaler Unterstützungsformen zu diskutieren. Ferner sollen Hinweise für die Ausbildung gegeben werden, um den Lehr- und Lernprozess stärker an den Erfordernissen der frühen Entwurfsphasen orientieren zu können.

8.2 Fragestellungen und Hypothesen

Aus den im Kapitel 2 zitierten Befunden und der vor der Hauptuntersuchung durchgeführten Fragebogenerhebung sowie der experimentellen Pilotstudie ließen sich die folgenden, nach Bereichen aufgegliederten Fragestellungen und Hypothesen ableiten.

8.2.1 Bereich der Ergebnisse

Die Güte der entwickelten Lösung sowie die dafür benötigte Zeit gelten in der Produktentwicklung als Schlüsselfaktoren für die Konkurrenzfähigkeit von Unternehmen. Aufgrund der wachsenden Bedeutung kooperativer Prozesse gerade in den frühen Entwurfsabschnitten stellt ferner die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts einen wichtigen Aspekt dar. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung interessiert daher folgende Fragestellung:

Fragestellung 1: Gibt es signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift, dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen in den frühen Entwurfsphasen im Hinblick auf die Ergebnisvariablen „Lösungsgüte“, „Bearbeitungszeit“ sowie „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts“?

Aufgrund der sich weitestgehend deckenden Anforderungen der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ an den Entwerfenden (vgl. Kapitel 4) und der in der Pilotstudie vergleichbaren Resultate beider Versuchsbedingungen im Hinblick auf die Ergebnisvariablen werden hier keine Unterschiede erwartet.
Die hypothetisch differierenden Anforderungen, die sich aus der Funktionsweise der Soft- und Hardware beim rechnergestützten Entwerfen (vgl. Kapitel 4) ergeben, zeigen sich vor allem in Form einer zusätzlichen Belastung der Mentalkapazität des Nutzers und in einer Behinderung des Aufbaus entsprechender mentaler Repräsentationen. Da die Bedienoperationen keine stufenweise Veränderung des Abstraktionsgrads der Darstellung zulassen, ist z. B. in den frühen Entwurfsabschnitten keine Kompatibilität der mentalen Repräsentationen des Entwerfenden mit dem Rechnermodell gegeben. Ferner ist die Art der Darstellung auf eine vornehmlich zweidimensionale Form beschränkt, die eventuell zu Erschwernissen bei der Verständigung mit anderen Personen führen kann. Weitere Einschränkungen ergeben sich für das externale Handeln: Ein rasches intuitives Arbeiten, wie es beim Freihandskizzieren möglich ist, wird durch die erforderliche sensumotorische Übersetzung behindert.
Die Ergebnisse der Fragebogenerhebung zu den Anfertigungs- bzw. Einsatzzwecken von Skizzen und CAD sowie zu den unterstützenden Auswirkungen bzw. wahrgenommenen Effekten beim Umgang damit (s. Abschnitte 6.4.3 und 6.4.4) stützen - ebenso wie die Ergebnisse der Pilotstudie bezüglich der Ergebnisvariablen - die folgenden Erwartungen:

Hypothese 1.1a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Ergebnisvariable „Lösungsgüte“.
Hypothese 1.1b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Ergebnisvariable „Lösungsgüte“ wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erzielen eine signifikant höhere Lösungsgüte als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 1.2a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Ergebnisvariable „Bearbeitungszeit".
Hypothese 1.2b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Ergebnisvariable „Bearbeitungszeit" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, benötigen signifikant weniger Zeit zur Bearbeitung der Problemstellung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 1.3a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Ergebnisvariable „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts".
Hypothese 1.3b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Ergebnisvariable „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erzielen signifikant höhere Werte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts sowohl im Hinblick auf die Kooperation mit technischen Laien als auch mit Experten als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

8.2.2 Bereich des Erlebens

Im Rahmen des menschenzentrierten Ansatzes der Psychologie steht beim Entwerfen das problemlösende Individuum im Mittelpunkt der Betrachtungen. Dieses nutzt zur Bewältigung der gestellten Probleme unterschiedliche Arbeitsmittel, wie etwa Papier und Bleistift oder 2D-CAD (vgl. Kapitel 2). Unter Einbeziehung der menschlichen Informationsverarbeitung mit ihren Möglichkeiten und Grenzen muss es Ziel sein, eine benutzergerechte Gestaltung von Arbeitsmitteln sowie eine sinnvolle Arbeitsteilung zwischen Mensch und Rechner zu gewährleisten.
Um das Entwurfshandeln ausreichend unterstützen zu können, ist die Perspektive des Nutzers von Arbeitsmitteln von entscheidender Bedeutung. Dessen subjektive Wahrnehmung der Problemstellung und der entwickelten Lösung bietet eine essentielle Interpretationsgrundlage für die beobachteten Ergebnisse und Prozesse des Entwerfens. Bezogen auf den in der vorliegenden Arbeit angestrebten Vergleich der eingeführten Arbeitsmittel hinsichtlich ihres Unterstützungspotentials in den frühen Entwurfsabschnitten ergibt sich daraus folgende Fragestellung:

Fragestellung 2: Gibt es signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift, dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen in den frühen Entwurfsphasen im Hinblick auf die Variablen des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit", „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit" sowie „Psychische Beanspruchung"?

Die im Kapitel 4 dargestellten hypothetischen Anforderungsunterschiede und -gemeinsamkeiten legen den Schluss nahe, dass sich die Arbeitsmittel „Papier und Bleistift" sowie „Graphiktablett" bei einem Einsatz in den frühen Entwurfsphasen ähnlich sind. Demnach verursachen sie durch die Merkmale ihrer Handhabungsweise weder nennenswerte Belastungen des Arbeitsgedächtnisses, noch behindern sie den Aufbau lösungsbegünstigender Problemrepräsentationen.
Beim Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift ergeben sich aufgrund der Charakteristiken, die das externale Handeln betreffen, keine bleiben psychomotorischen Lernerfordernisse. Die Nutzung des Graphiktabletts erfordert demgegenüber zwar leichte Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung; ferner sind je nach Software geringe Verzögerungen zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung zu erwarten. Dennoch kann aufgrund der Anforderungsgemeinsamkeiten davon ausgegangen werden, dass bei beiden Arbeitsmitteln eine unerhebliche psychophysische Zusatzbeanspruchung gegeben ist.
Das Arbeitsmittel „CAD" hingegen stellt diesbezüglich erheblich höhere Anforderungen an den Nutzer. Die Notwendigkeit, bei der Bedienung einer vorgeschriebenen Systemlogik zu folgen, okkupiert hypothetisch Teile der Mentalkapazität. Diese stehen dann für die eigentliche Problembearbeitung nicht mehr zur Verfügung. Daneben wird durch die strukturellen Vorgaben der Software und die Eigenschaften der Hardware sowohl der Aufbau geeigneter mentaler Repräsentationen als auch deren Externalisierung erschwert.
Obwohl sich in der Pilotstudie keine eindeutigen arbeitsmittelbedingten Unterschiede bei den Variablen des Erlebens nachweisen ließen, wird erwartet, dass die hypothetischen Anforderungsabweichungen von CAD im Vergleich zu Papier und Bleistift und Graphiktablett erkennbare Einflüsse in der experimentellen Hauptuntersuchung ausüben.

Hypothese 2.1a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Variable des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit".

Hypothese 2.1b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Variable des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit“ wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erleben die Problemstellung als signifikant weniger schwierig als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 2.2a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Variable des Erlebens „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit“.
Hypothese 2.2b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Variable des Erlebens „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit“ wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, sind sich hinsichtlich der Richtigkeit der Lösung signifikant sicherer als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 2.3a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Variable des Erlebens „Psychische Beanspruchung“.
Hypothese 2.3b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Variable des Erlebens „Psychische Beanspruchung“ wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erleben eine signifikant geringere psychische Beanspruchung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

8.2.3 Bereich des Prozesses

Um das Unterstützungspotential der verschiedenen Arbeitsmittel beurteilen zu können, ist es neben der Erfassung des Grades der Zielerreichung in Form der Ergebnisvariablen notwendig, den Prozess der frühen Entwurfsphasen zu beleuchten. Hierbei müssen neben den äußeren, sichtbaren Handlungen als Teiltätigkeiten die durchgeführten, auch internalen Entwurfsschritte analysiert werden.

Zur Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte“ sollen im Rahmen dieser Arbeit keine Hypothesen formuliert werden, da das im Rahmen der Pilotstudie entwickelte Kategorienschema zunächst mittels eines Extremgruppenvergleichs erprobt werden soll. Dabei empfiehlt sich ein hypothesengenerierendes Vorgehen.
Zur genauen Beschreibung des Vorgehens ist ferner die Art und Weise der Lösungserzeugung von Interesse. Somit stellt sich die folgende Frage:

Fragestellung 3: Gibt es signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift, dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen in den frühen Entwurfsphasen im Hinblick auf die Prozessvariablen „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten“ sowie „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen“?

Die Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ sowie „Graphiktablett“ bedingen beide ein Entwerfen durch Freihandskizzieren. Da sich der Gebrauch des Graphiktabletts als „digitales Papier“ verstärkt an die Eigenschaften des herkömmlichen Skizzierens anlehnt, werden gleichartig gestaltete Entwurfsprozesse erwartet. Bezüglich der beiden Prozesskriterien „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten“ und „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen“ dienen ferner die Ergebnisse der experimentellen Pilotstudie als richtungsweisend.

Das Erzeugen einer bildlichen Darstellung mit einem CAD-System ist durch erhebliche Unterschiede im Vergleich zum Erstellen einer Freihandskizze gekennzeichnet (vgl. Abschnitt 2.3.2). Daher wird ein andersartiger Entwurfsprozess im Hinblick auf die Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten angenommen. An dieser Stelle soll keine gerichtete Hypothese formuliert werden, da diesbezüglich weder in der Literatur Befunde bekannt sind, noch die Ergebnisse der Pilotstudie zu begründeten Schlussfolgerungen führen.
2D-CAD gilt als weniger intuitives Arbeitsmittel: Die lange Dauer für die Entwurfserstellung und der durch den Zwang zur exakten Produktdefinition eingeschränkte Interpretationsfreiraum lassen eine Einengung der Variantenbildung erwarten. Auch in der Fragebogenerhebung wird die Funktion der Lösungshilfe in Form der Generierung neuer Ideen für ein Lösungskonzept größtenteils dem Entwerfen durch Freihandskizzieren zugeschrieben (vgl. Abschnitte 6.4.3 und 6.4.4).

Hypothese 3.1a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten".
Hypothese 3.1b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten".

Hypothese 3.2a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift im Vergleich zum Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Prozessvariable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen".
Hypothese 3.2b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Prozessvariable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, zeigen signifikant seltener ein korrigierendes Vorgehen bei der Lösungserzeugung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

8.2.4 Replikation der Ergebnisse

Bei weitgehender Hypothesenkonformität soll in einem zweiten Schritt überprüft werden, ob die Ergebnisse des Entwurfsproblems „Gartengrill" allein problemspezifischer Natur sind oder ob sie eine Generalisierung zulassen. Um keine Konfundierung zwischen Inhaltseffekt und Problemschwierigkeit zu erhalten, soll die Replizierbarkeit dieser Ergebnisse an einer Problemstellung mit vergleichbarem Schwierigkeitsgrad getestet werden.
Fragestellung 4: Lassen sich die erwarteten Ergebnisse bei einer weiteren Problemstellung vergleichbarer Schwierigkeit replizieren oder sind sie problemspezifisch?

Es wird angenommen, dass sich die Ergebnisse bei der inhaltlich unterschiedlichen, aber vergleichbar schwierigen Problemstellung „Korkenzieher" replizieren lassen. Auf der Grundlage der Fragestellungen 1 bis 3 wird analog folgendes erwartet:

8.2.4.1 Bereich der Ergebnisse

Hypothese 4.1.1a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Ergebnisvariable „Lösungsgüte".

Hypothese 4.1.1b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Ergebnisvariable „Lösungsgüte" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erzielen eine signifikant höhere Lösungsgüte als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 4.1.2a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Ergebnisvariable „Bearbeitungszeit".

Hypothese 4.1.2b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Ergebnisvariable „Bearbeitungszeit" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, benötigen signifikant weniger Zeit zur Bearbeitung der Problemstellung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 4.1.3a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Ergebnisvariable „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts".

Hypothese 4.1.3b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Ergebnisvariable „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erzielen signifikant höhere Werte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts sowohl im Hinblick auf die Kooperation mit technischen Laien als auch mit Experten als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

8.2.4.2 Bereich des Erlebens

Hypothese 4.2.1a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Variable des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit".

Hypothese 4.2.1b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Variable des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erleben die Problemstellung als signifikant weniger schwierig als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 4.2.2a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Variable des Erlebens „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit".

Hypothese 4.2.2b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Variable des Erlebens „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, sind sich hinsichtlich der Richtigkeit der Lösung signifikant sicherer als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

Hypothese 4.2.3a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Variable des Erlebens „Psychische Beanspruchung".

Hypothese 4.2.3b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Variable des Erlebens „Psychische Beanspruchung" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, erleben eine signifikant geringere psychische Beanspruchung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

8.2.4.3 Bereich des Prozesses

Hypothese 4.3.1a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten".

Hypothese 4.3.1b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten".

Hypothese 4.3.2a: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezüglich der Prozessvariable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen".

Hypothese 4.3.2b: Es existieren signifikante Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett und dem rechnergestützten Entwerfen bezüglich der Prozessvariable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen" wie folgt: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwerfen, zeigen signifikant seltener ein korrigierendes Vorgehen bei der Lösungserzeugung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwerfen.

8.3 Untersuchungsdesign

Bei der Hauptuntersuchung handelte es sich um eine experimentelle Laborstudie, die im Vergleich zu Beobachtungen im Feld eine standardisierte Untersuchung der interessierenden Fragestellungen mit einer deutlich größeren Probandenanzahl ermöglichte. So konnten von allen Teilnehmern kongruente Aufträge mit unterschiedlichen Arbeitsmitteln unter ansonsten identischen Bedingungen bearbeitet und vergleichende Analysen vorgenommen werden. Aufgrund der Isolierung einzelner Versuchsbedingungen und der Kontrolle von Störvariablen bestand die Möglichkeit zu differenzierten Beobachtungen und Zeitstudien.

Die im Rahmen der Pilotstudie getestete Gruppeneinteilung wurde beibehalten. Die Zuordnung der Probanden zu den beiden experimentellen Bedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren" erfolgte durch Randomisierung. Bei der Bedingung „Rechnergestütztes Entwerfen" teilte man aus einer vorab selektierten Stichprobe, die ihre Fertigkeit im Umgang mit AutoCAD als mindestens gut eingestuft hatte, randomisiert zu. Dadurch wurde zusätzlich zur Homogenität dieser Untersuchungsgruppe beigetragen, und ausschließlich das Arbeitsmittel und nicht die Kenntnisse oder die vom Probanden benötigte Einarbeitungszeit in das Programm getestet.

Zur Analyse des Unterstützungspotentials der verschiedenen Arbeitsmittel für die Problemstellung „Gartengrill“ wurde der in Tabelle 36 dargestellte Versuchsplan realisiert.

Tab. 36: Untersuchungsplan der Hauptuntersuchung (N = 66; Entwurfsproblem „Gartengrill“): einfaktorieller Randomisierungsplan mit drei Stufen

	R
Experimentelle Bedingung	
(1) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift	n = 22
(2) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett	n = 22
(3) Rechnergestütztes Entwerfen	n = 22

Bei weitestgehend hypothesenkonformen signifikanten Unterschieden zwischen den drei Versuchsgruppen sollte in einem zweiten Schritt überprüft werden, ob sich die Ergebnisse des Entwurfsproblems „Gartengrill“ mit der gleichen Stichprobe bei einer vergleichbar schwierigen Problemstellung ohne inhaltliche Transfermöglichkeiten replizieren lassen (vgl. Teilkapitel 7.2). Dazu sollten die Versuchspersonen das Entwurfsproblem „Korkenzieher“ gegebenenfalls mit einem anderen Arbeitsmittel bearbeiten, um bei der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ einen gerätebezogenen Lerneffekt zu vermeiden. Auch ließen sich auf diese Weise die Aussagen doppelt so vieler Probanden über das Graphiktablett gewinnen. Bei dem Versuchsplan für die Replikationsuntersuchung handelte es sich somit um einen ausbalancierten Plan (s. Tabelle 37).

Tab. 37: Untersuchungsplan der Replikationsuntersuchung (N = 66; Entwurfsproblem „Korkenzieher“): ausbalancierter einfaktorieller Plan mit drei Stufen

Experimentelle Bedingung	
(1) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift	N = 22
(2) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett	N = 22
(3) Rechnergestütztes Entwerfen	N = 22

Dabei wurde erwogen, dass bei der Prüfung der Replizierbarkeit arbeitsmittelbedingter Unterschiede der Wechsel des Arbeitsmittels zur Bearbeitung einer inhaltlich anderen Problemstellung bei derselben Stichprobe den personenbedingten Varianzanteil verringern könnte, und in der Replikationsuntersuchung Effekte der einzelnen Arbeitsmittel durch Einflüsse der Testwiseness verstärkt werden. Lerneffekte, die für eine generelle Verbesserung im Rahmen der Re-

plikation sprechen würden, waren aufgrund der ausgewählten Problemstellungen sowie der Ausbalancierung in den Arbeitsmitteln nicht plausibel.

8.4 Stichprobe

Zwischen den experimentellen Bedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren“ und „Rechnergestütztes Entwerfen“ wurden große Anforderungsunterschiede im Sinne starker Effekte angenommen (vgl. Kapitel 4). Der erforderliche Stichprobenumfang betrug 21 Versuchspersonen pro Zelle, also insgesamt 63, um bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0.05$, einer Teststärke von $1\text{-}\beta = 0.80$ sowie zwei Freiheitsgraden einen starken Effekt ($f = 0.40$) varianzanalytisch zu belegen (vgl. Bortz et al., 1995). Damit im Falle einer Replikationsuntersuchung jede Arbeitsmittelkombination gleich oft vorhanden war, wurde der Umfang der Stichprobe auf $N = 66$ festgesetzt.

Bei den Probanden handelte es sich ausschließlich um Studierende der Fakultät Maschinenwesen im Hauptstudium (5. bis 13. Semester), deren durchschnittliches Alter 24 Jahre ($SD = 3.41$) betrug. Entsprechend der geschlechtsspezifischen Präferenzen für die genannten Studienrichtungen waren 63 (95,5 %) der insgesamt 66 Untersuchungsteilnehmer männlich und nur 3 (4,5 %) weiblich. Zum Untersuchungszeitpunkt konnten alle ein abgeschlossenes Vordiplom in einem relevanten Studiengang vorweisen. Die Teilnehmer entstammten zu 90 % dem Studiengang Maschinenbau und zu 10 % dem der Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik. Die genaue prozentuale Verteilung der Probanden auf die verschiedenen Studienrichtungen kann im Anhang A2 eingesehen werden.

14 (21 %) hatten vor Beginn ihres Studiums eine Lehre im technischen Bereich absolviert; insgesamt 11 (17 %) konnten während eines Praktikums berufspraktische Erfahrungen im Bereich „Technisches Zeichnen/Konstruktion“ sammeln.

Durch die Teilnahmevoraussetzung „abgeschlossenes Vordiplom der Fakultät Maschinenwesen“ sollte die Homogenität der Stichprobe sichergestellt werden. Man ging davon aus, dass die untersuchten Personen durch das identische Grundstudium einen ähnlichen Wissensstand im Hinblick auf das Konstruieren und vergleichbare Kenntnisse bezüglich der Bedienung des Programms AutoCAD besaßen. Alle Teilnehmer arbeiteten zum Untersuchungszeitpunkt seit mindestens zwei Jahren mit diesem Programm, so dass diesbezügliche Vertrautheitsdefizite ausgeschlossen werden konnten. Um eine weitere Homogenisierung der Stichprobe zu gewährleisten, wurden neben den bei der Stichprobenauswahl berücksichtigten individuellen Leistungsvoraussetzungen aufgrund bekannter Beziehungen zu der geforderten Leistung die Motivation der

Untersuchungsteilnehmer zur Bearbeitung der Problemstellung sowie ihre Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung pro Versuchsbedingung bezüglich der Mittelwertsgleichheit kontrolliert.
Die Teilnahme war freiwillig und wurde vergütet.

8.5 Experimentelle Bedingungen

Die Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ und „Rechnergestütztes Entwerfen“ wurden in der Hauptuntersuchung ohne Änderungen übernommen.

Bei der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ ergab sich durch eine Kooperation mit der Firma WACOM die Möglichkeit, das Nachfolgermodell des im Rahmen der Pilotstudie genutzten Geräts einzusetzen. In der Hauptuntersuchung verwendeten die Probanden die Nachfolgerversion *Cintiq 15X*, einen 4,7 kg schweren Monitor mit 15,1`` großem Display (Diagonale 38 cm), der durch einen verstellbaren Fuß stufenlos in der Höhe variiert werden kann. Neben der um rund 30 % erweiterten Bildschirmdarstellung bietet das *Cintiq 15X* im Vergleich zum *PL-400* einen breiteren Blickwinkel, eine höhere Schärfe und einen besseren Kontrast in der Darstellung sowie eine Farbtiefe von 24 Bit. Die LCD-Oberfläche ist gegen Spiegelung und Kratzer versiegelt und ermöglicht durch eine rauhere Beschichtung eine realistischere „Stift-auf-Papier“-Haptik sowie durch einen erhöhten Ablesewinkel von 160 Grad (horizontal/vertikal) eine bessere Lesbarkeit unter wechselnden Lichtverhältnissen. Als Software wurde das Programm *ParaGraph PenOffice*^{TM} beibehalten.

8.6 Ergänzungen zu den abhängigen Variablen

8.6.1 Ergebnisvariablen

8.6.1.1 Lösungsgüte

Aufgrund der in der Pilotstudie erzielten hohen Urteilerübereinstimmung von über 88 % wurde die Bewertung der Lösungsgüte in der Hauptuntersuchung von einem Konstrukteur sowie der Versuchsleiterin nach den vorgestellten Bewertungsschemata vorgenommen (s. Abschnitt 7.6.2.1 und Anhang A13/14). Die beiden Beurteiler notierten zunächst unabhängig voneinander für jede Versuchsperson ihre Wertungen. Diese wurden anschließend in mehreren Gruppensitzungen besprochen und bei nicht einstimmigen Entscheidungen eingehend diskutiert, bis eine begründbare Konsensentscheidung vorlag.

8.6.1.2 Bearbeitungszeit

Die Pilotstudie hatte gezeigt, dass bei beiden Problemstellungen mit allen drei Arbeitsmitteln eine Lösungserarbeitung in dem dafür vorgesehenen Zeitraum von 90 Minuten realistisch ist. Dem Probanden wurde bewusst keine zeitliche Begrenzung gesetzt; er war jedoch darüber informiert, dass für den Versuch eine Zeitdauer von etwa zwei Stunden angedacht war. Um den für den Gesamtversuch vorgesehenen zeitlichen Rahmen nicht deutlich zu überschreiten, wurde die Bearbeitung von der Versuchsleiterin nach 110 Minuten abgebrochen, falls bis dahin noch kein Ergebnis erzielt worden war. Dieses Erfordernis trat dreimal unter der Bedingung „Rechnergestütztes Entwerfen“ auf. Um nachteilige Verzerrungen innerhalb dieser Bedingung zu vermeiden, wurden die drei Probanden aus der Stichprobe ausgeschlossen.

8.6.1.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Die in der Pilotstudie erreichten Werte für die Urteilerübereinstimmung von mindestens 81 % für die Empfängergruppe „Experte“ und 92 % für die Empfängergruppe „Technischer Laie“ erlaubten, dass die Bewertung der Entwürfe der Hauptuntersuchung ausschließlich von einem Studenten des Technischen Designs und der Versuchsleiterin vorgenommen werden konnten.

8.6.2 Variablen des Erlebens

Die Variablen des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit“, „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit“ und „Psychische Beanspruchung“ wurden in der Hauptuntersuchung entsprechend der im Abschnitt 7.6.2.2 vorgestellten Methoden erfasst.

8.6.3 Prozessvariablen

8.6.3.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Die Erfassung der Teiltätigkeiten erfolgte in der Hauptuntersuchung computergestützt entsprechend dem im Abschnitt 7.6.2.3 vorgestellten Kategorienschema.

8.6.3.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Um das Entwerfen als Beispielfall für komplexe Arbeitstätigkeiten mit hohen kognitiven Anforderungen einer Analyse zugänglich zu machen, wurde eine Untersuchungsmethodik entwikkelt, die es erlaubt, begründet auf den „inneren Verlauf“ des Entwurfsprozesses zu schließen.

Die Erfassung der beim Entwerfen ausgeführten Teiltätigkeiten betrifft die Ebene des äußerlich Beobachtbaren. Vor allem die Teiltätigkeiten des Skizzierens bzw. Zeichnens und des Betrachtens der Skizze bzw. Zeichnung können jedoch unterschiedliche Funktionen im Handlungsprozess erfüllen. Diese bedürfen einer differenzierten Untersuchung. Auch wahrgenommene äußere Inaktivität muss genauer spezifiziert werden, um Rückschlüsse auf den Inhalt des dabei vollzogenen inneren Handelns zu ermöglichen. Um die Phasen, in denen keine sichtbare Aktivität stattfindet, genauer bestimmen zu können, war es erforderlich, die im Entwurfsprozess getätigten Schritte in die Betrachtung miteinzubeziehen. Erfasst werden sollten sowohl die Häufigkeiten der Entwurfsschritte, die der Proband bis zur Fertigstellung des Entwurfs bei der Lösungserarbeitung durchführte, als auch ihre Abfolgen.
In der Hauptuntersuchung fand diese aufwendige Prozedur aufgrund des Erkundungscharakters der methodischen Umsetzung dieser Zielstellung ausschließlich bei Extremgruppen Verwendung. Die entsprechenden Probanden waren aufgrund der Kombination der Kriterien Lösungsgüte und Bearbeitungszeit aus der Gesamtstichprobe ausgewählt worden. D. h., man stellte den drei Probanden, die die jeweils höchsten Lösungsgüten in der kürzesten Bearbeitungszeit erzielt hatten, die drei mit den geringsten Werten für die Lösungsgüte und der längsten Bearbeitungszeit gegenüber.
Die Entwurfsschritte dieser Versuchsteilnehmer wurden im Konsensverfahren zusammen mit der an der Entwicklung des Kategorienschemas beteiligten Psychologin kodiert. Als Grundlage diente das im Anhang A16 einsehbare Kodierungsschema mit detaillierten Informationen zu den entsprechenden Formen der jeweiligen Schrittarten und Beispielen mit Erläuterungen.

Um das Schema auf seine Objektivität hin zu prüfen, nahm ein weiterer Beobachter (Konstrukteur) die Kodierung der getätigten Entwurfsschritte von je Problemstellung drei zufällig aus den Extremgruppen ausgewählten Probanden vor. Durch die Ereignisfraktionierung in Zeittakten von fünf Minuten (s. Abschnitt 7.6.2.3) konnten die Protokolle anschließend einer Bewertung der Urteilerübereinstimmung unterzogen werden.
Die Übereinstimmung der Kodierungen betrug bei der Problemstellung „Gartengrill“ 87 % bei N = 1605 abgegebenen Urteilen. Bei der Problemstellung „Korkenzieher“ lag sie bei 79 % (N = 1530).

8.6.3.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Das Vorgehen bei der Lösungserzeugung wurde wie im Abschnitt 7.6.2.3 beschrieben, erhoben.

8.7 Verfahren der statistischen Datenauswertung

Zur Auswertung wurden die Daten nach Entwurfsproblemen getrennt den Fragestellungen entsprechend aufbereitet, und das Statistikprogramm SPSS für Windows 10.0 herangezogen. Den statistischen Analysen lagen neben deskriptiven Statistiken nahezu ausschließlich multivariate und univariate Mittelwertsvergleiche zugrunde.

In einem ersten Schritt prüfte man mit einer einfaktoriellen multivariaten Varianzanalyse (MANOVA = Multivariate Analysis of Variance), ob sich in den Variablenbereichen „Ergebnisse“ und „Erleben“ – unter Berücksichtigung möglicher Abhängigkeiten zwischen den abhängigen Variablen - zwischen den verschiedenen experimentellen Bedingungen Effekte zeigen lassen. D. h., es wurden mehrere, in Beziehung stehende abhängige Variablen simultan untersucht, um herauszufinden, wie die Effekte unter Berücksichtigung der Kovarianzen der abhängigen Variablen in ihrer Gesamtheit aussehen (vgl. Bortz, 1989, 714). Beim Variablenbereich „Prozess“ wurde ausschließlich die Variable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten“ einer MANOVA unterzogen; die Ergebnisdarstellung der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte“ erfolgte in einem Extremgruppenvergleich, die der Variable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen“ aufgrund des Datenniveaus deskriptiv.

Dieses Vorgehen ist immer dann angezeigt, wenn ein komplexes Merkmal durch mehrere Indikatoren operationalisiert wird (Huberty & Morris, 1989). Mit diesem Vorgehen kann außerdem vermieden werden, dass die mit der mehrfachen Durchführung univariater Analysen am selben Datenmaterial verbundene Kumulation von Alpha- und Beta-Fehler zu falschen Entscheidungen in der Beurteilung der Signifikanz der Ergebnisse führt.

Im Anschluss an die multivariate Testung wurde für eine differenziertere Interpretation der auf multivariater Ebene signifikanten Effekte der Einfluss der unabhängigen Variable auf die einzelnen abhängigen Variablen je nach Fragestellung, Datenniveau und Verteilungsform durch einfaktorielle univariate Varianzanalysen (ANOVA = Analysis of Variance) spezifiziert.

Diesem Vorgehen einer globalen Hypothesenprüfung wurde gegenüber A-Priori-Einzelvergleichen der Vorrang gegeben, da

- zu der in dieser Arbeit untersuchten Vielzahl abhängiger Variablen in der Literatur empirische Befunde und geeignete Theorien, die eindeutige Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Richtung der zu erwartenden Effekte zulassen, in nicht ausreichendem Maße existieren;
- den Ergebnissen im Rahmen der Pilotstudie aufgrund der geringen Stichprobengröße keine ausreichende Beweiskraft zukommt.

Darüber hinaus ist das Arbeitsmittel „Graphiktablett“ bislang nicht Gegenstand derartiger Untersuchungen gewesen.

Im Anschluss daran sollten A-Posteriori-Einzelvergleiche darüber Aufschluss geben, welche Einzelvergleiche maßgeblich dafür verantwortlich sind, dass die globale Nullhypothese der Varianzanalyse zu verwerfen ist. Das Risiko, die varianzanalytische Nullhypothese über einen Einzelvergleichstest fälschlicherweise zu verwerfen, steigt bei a-posteriori durchgeführten Einzelvergleichen mittels t-Test. Es wird deshalb empfohlen, A-Posteriori-Einzelvergleiche mit Verfahren durchzuführen, die ex-post den mit allen Einzelvergleichen verbundenen Hypothesenkomplex auf einem vorgegebenen Alpha-Niveau absichern (vgl. Bortz, 1993, 250). In der vorliegenden Arbeit wurde der Duncan-Test gewählt. Ergebnisse mit $p < .05$ galten als signifikant, mit $p < .01$ als hochsignifikant.

Konnten weder auf multi- noch auf univariater Ebene signifikante Unterschiede zwischen den drei Versuchsgruppen gefunden werden, so erfolgt die Darstellung der Ergebnisse lediglich tabellarisch in Form deskriptiver Kennwerte für die jeweilige Variable (s. Kapitel 8.8 und 8.10).

8.8 Ergebnisse der experimentellen Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“

8.8.1 Prüfung der Stichprobenhomogenität

8.8.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung

Bezogen auf die Gesamtstichprobe (N = 66) lag mit einem Mittelwert von 6,2 (SD = .75) eine hohe Motivation zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill“ vor.

Bei der varianzanalytischen Überprüfung, ob sich die Probanden der drei experimentellen Bedingungen hinsichtlich ihres Commitments unterscheiden, konnten zwischen den Versuchsgruppen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ($F_{ANOVA} = 1{,}268$; $p > .05$).

Die deskriptiven Kennwerte für die Motivation der drei Versuchsgruppen zur Bearbeitung der Problemstellung sind in der Tabelle 38 zusammengefasst.

Tab. 38: Motivation der Versuchsgruppen zur Bearbeitung der Problemstellung (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Motivation** (MW $\pm$ SE) (0: überhaupt nicht motiviert – 7: sehr motiviert)
(1) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift (Papier und Bleistift)	6,3 $\pm$ .10 (SD = .48)
(2) Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett (Graphiktablett)	6,2 $\pm$ .17 (SD = .81)
(3) Rechnergestütztes Entwerfen (2D-CAD)	6,0 $\pm$ .19 (SD = .89)

8.8.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung

Bei der Gesamtstichprobe (N = 66) konnte mit einem Mittelwert von 2,0 (SD = 1.16) eine durchschnittliche Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung verglichen mit der entsprechenden Eichstichprobe festgestellt werden. 24 Probanden (36,4 %) wurden aufgrund ihres Ergebnisses im Dreidimensionalen Würfeltest (Gittler, 1990) als weit unterdurchschnittlich oder unterdurchschnittlich eingestuft, acht Teilnehmer (12,1 %) erreichten einen durchschnittlichen und 34 (51,5 %) einen überdurchschnittlichen Wert.

Zwischen den einzelnen Versuchsgruppen ergab eine einfaktorielle ANOVA keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung (F_{ANOVA} = 1,971; p > .05).

Die Tabelle 39 gibt einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte für die Fähigkeit der drei Versuchsgruppen zur räumlichen Vorstellung.

Tab. 39: Fähigkeit der Versuchsgruppen zur räumlichen Vorstellung (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung** (MW $\pm$ SE) (0: weit unterdurchschnittlich – 3: überdurchschnittlich)
(1) Papier und Bleistift	2,3 $\pm$ .25 (SD = 1.17)
(2) Graphiktablett	1,7 $\pm$ .23 (SD = 1.09)
(3) 2D-CAD	2,1 $\pm$ .25 (SD = 1.17)

8.8.2 Ergebnisse zur Fragestellung 1: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich der Ergebnisse

Im Hinblick auf die ergebnisbezogenen Variablen „Lösungsgüte", „Bearbeitungszeit" und „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts" erbrachte eine einfaktorielle MANOVA beim Entwurfsproblem „Gartengrill" hochsignifikante Unterschiede zwischen mindestens zwei der drei Versuchsgruppen ($F_{MANOVA} = 6{,}417$; $p < .001$).

Univariate Analysen erbrachten bei den betrachteten Variablen folgende Resultate:

8.8.2.1 Lösungsgüte

Der von der Gesamtstichprobe (N = 66) erzielte Durchschnittswert für die Güte der Lösung lag bei der Problemstellung „Gartengrill" gemäß einer Expertenbeurteilung bei 56,0 % (SD = 34.89).

Hinsichtlich der Lösungsgüte zeigte sich mittels einer einfaktoriellen ANOVA ein hochsignifikanter Gruppenunterschied ($F_{ANOVA} = 12{,}162$; $p < .001$).

Zwischen den Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift" und „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett" zeigten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Lösungsgüte der produzierten Entwürfe ($p_{1/2} > .05$). Die Probanden der erstgenannten Bedingung erzielten für die Güte der konstruktiven Lösung im Mittel einen Wert von 75,0 % relativ zur Ideallösung; der Wert derjenigen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, war mit durchschnittlich 61,7 % etwas geringer.

Die Teilnehmer dieser beiden experimentellen Bedingungen unterschieden sich beim Entwurfsproblem „Gartengrill" jedoch hochsignifikant von der Gruppe der rechnergestützt Entwerfenden im Bezug auf die Güte der erstellten Entwurfslösung ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .01$). Deren Lösungsgüte wurde gemessen an der Ideallösung im Mittel mit einem Wert von 31,3 % eingestuft.

Die deskriptiven Kennwerte für die Lösungsgüte der drei Versuchsgruppen sind in der Tabelle 40 zusammengefasst.

Tab. 40: Lösungsgüte der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill")

Experimentelle Bedingung	**Lösungsgüte** (in %) (MW $\pm$ SE der relativen Häufigkeiten)
(1) Papier und Bleistift	75,0 (0,750) $\pm$ 4.29 (SD = 20.14)
(2) Graphiktablett	61,7 (0,617) $\pm$ 7.55 (SD = 35.42)
(3) 2D-CAD	31,3 (0,313) $\pm$ 6.94 (SD = 32.54)

8.8.2.2 Bearbeitungszeit

Die zur Lösung des Entwurfsproblems „Gartengrill“ benötigte Zeit betrug bei der Gesamtstichprobe (N = 66) durchschnittlich 66,1 Minuten (SD = 21.65).

Im Bezug auf die Bearbeitungszeit ergab ein varianzanalytischer Vergleich einen hochsignifikanten Gruppenunterschied (F_{ANOVA} = 44,477; $p < .001$).

Die Teilnehmer der Untersuchungsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ und „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ unterschieden sich nicht signifikant in der Bearbeitungszeit ($p_{1/2} > .05$): Die Probanden benötigten durchschnittlich 50,8 bzw. 58,5 Minuten bis zur Fertigstellung der Lösung.

Die Probanden der beiden Versuchsgruppen (1) und (2) unterschieden sich hochsignifikant in der bis zur Fertigstellung der Lösung benötigten Zeit von den Probanden, die mit AutoCAD entwarfen ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .01$). Die Erarbeitung des Gartengrills dauerte bei den rechnergestützt Entwerfenden im Mittel 88,9 Minuten.

Die Tabelle 41 gibt einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte für die Bearbeitungszeit der drei Versuchsgruppen.

Tab. 41: Bearbeitungszeit der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Bearbeitungszeit** (in Min.) (MW $\pm$ SE)
(1) Papier und Bleistift	50,8 $\pm$ 3.25 (SD = 15.26)
(2) Graphiktablett	58,5 $\pm$ 2.82 (SD = 13.24)
(3) 2D-CAD	88,9 $\pm$ 2.97 (SD = 13.91)

8.8.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Die Gesamtstichprobe (N = 66) erreichte beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ bezogen auf die Empfängergruppe „Technischer Laie“ für den Teilbereich „Höhenverstellung“ einen Durchschnittswert von 3,4 (SD = 3.13) und für die Peripherie einen Wert von 3,6 (SD = 2.89) bei einer maximal erreichbaren Punktzahl von 8. Bei der Empfängergruppe „Experte“ wurden die Entwürfe in ihrer Gesamtheit im Mittel mit 3,1 Punkten je Teilbereich (SD = 3.06 bzw. 3.02) eingestuft.

Hinsichtlich der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts zeigte sich mittels einer einfaktoriellen ANOVA ein hochsignifikanter Gruppenunterschied sowohl bezüglich der beiden Empfängergruppen als auch bezüglich der zwei Teilbereiche (F_{ANOVA} = 12,694/11,428; 12,799/12,872; jeweils $p < .001$).

Ein Vergleich der Probanden der Versuchsbedingungen (1) und (2) ergab weder hinsichtlich der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Entwürfe an Laien noch an Experten signifikante Unterschiede (jeweils $p_{1/2} > .05$). Sie erreichten Werte zwischen 4,0 und 4,9.

Die durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen unterschieden sich sowohl hinsichtlich der Empfängergruppen als auch der Teilbereiche hochsignifikant von den rechnergestützt Entwerfenden (jeweils $p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .01$). Deren durchschnittliche Werte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts betrugen 1,1 für den Teilbereich „Höhenverstellmechanismus“ bzw. 1,5 für die Peripherie bezogen auf die Empfängergruppe „Laie“. Hinsichtlich der Kooperation mit Experten wurden die mit AutoCAD erstellten Entwürfe im Mittel mit 0,8 bzw. 0,9 Punkte bewertet.

Die deskriptiven Kennwerte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der drei Versuchsgruppen sind getrennt nach Empfängergruppen und Teilbereichen in der Tabelle 42 zusammengefasst.

Tab. 42: Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts** (MW $\pm$ SE) (max. Punktzahl: 8)
(1) Papier und Bleistift	Laien Höhenverstellung: 4,9 $\pm$ .63 (SD = 2.97)
	Peripherie: 4,6 $\pm$ .54 (SD = 2.52)
	Experten Höhenverstellung: 4,4 $\pm$ .65 (SD = 3.05)
	Peripherie: 4,0 $\pm$ .61 (SD = 2.85)
(2) Graphiktablett	Laien Höhenverstellung: 4,1 $\pm$ .63 (SD = 2.94)
	Peripherie: 4,6 $\pm$ .65 (SD = 3.06)
	Experten Höhenverstellung: 4,1 $\pm$ .65 (SD = 3.05)
	Peripherie: 4,6 $\pm$ .67 (SD = 3.14)
(3) 2D-CAD	Laien Höhenverstellung: 1,1 $\pm$ .43 (SD = 2.01)
	Peripherie: 1,5 $\pm$ .38 (SD = 1.79)
	Experten Höhenverstellung: 0,8 $\pm$ .30 (SD = 1.41)
	Peripherie: 0,9 $\pm$ .30 (SD = 1.42)

8.8.3 Ergebnisse zur Fragestellung 2: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Erlebens

Eine einfaktorielle MANOVA zeigte, dass sich die drei experimentellen Bedingungen beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ im Hinblick auf die Variablen des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit“, „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit“ und „Psychische Beanspruchung“ nicht signifikant voneinander unterscheiden (F_{MANOVA} = ,870; p > .05).

In univariaten Analysen ergab sich im Hinblick auf die betrachteten Variablen das folgende Bild:

8.8.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit

Die Gesamtstichprobe (N = 66) stufte die Problemstellung „Gartengrill“ mit einem durchschnittlichen Wert von 4,3 (SD = 1.54) ein, d. h., die Untersuchungsteilnehmer erlebten das Entwurfsproblem im Mittel als eher weniger schwierig.

Eine univariate Testung erbrachte keinen signifikanten Gruppenunterschied (F_{ANOVA} = ,036; p > .05). Die deskriptiven Kennwerte für die erlebte Problemschwierigkeit der drei Versuchsgruppen sind in der Tabelle 43 dokumentiert.

Tab. 43: Erlebte Problemschwierigkeit der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Erlebte Problemschwierigkeit** (MW $\pm$ SE) (0: sehr schwierig – 7: überhaupt nicht schwierig)
(1) Papier und Bleistift	4,4 $\pm$ .30 (SD = 1.38)
(2) Graphiktablett	4,3 $\pm$ .33 (SD = 1.53)
(3) 2D-CAD	4,2 $\pm$ .37 (SD = 1.75)

8.8.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit

Ihre Sicherheit hinsichtlich der technischen Richtigkeit der Lösung schätzte die Gesamtstichprobe (N = 66) bei der Problemstellung „Gartengrill“ durchschnittlich mit einem Wert von 4,8 (SD = 1.39) ein. Die Versuchspersonen waren sich hinsichtlich der Richtigkeit der von ihnen produzierten Entwurfslösung also eher sicher.

Auf univariater Ebene ergab sich kein signifikanter Gruppenunterschied (F_{ANOVA} = 1,071; p > .05). Die Tabelle 44 zeigt die deskriptiven Kennwerte für die Sicherheit der drei Versuchsgruppen hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit.

Tab. 44: Sicherheit der Versuchsgruppen hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Sicherheit** (MW ± SE) (0: überhaupt nicht sicher – 7: vollkommen sicher)
(1) Papier und Bleistift	5,0 ± .19 (SD = .91)
(2) Graphiktablett	5,0 ± .30 (SD = 1.40)
(3) 2D-CAD	4,5 ± .37 (SD = 1.74)

8.8.3.3 Psychische Beanspruchung

Die erlebten Veränderungen bezüglich der beanspruchungsrelevanten Faktoren bestimmte man durch die Differenz aus Prä- und Posttestwerten. Bezogen auf die Gesamtstichprobe (N = 66) ergaben sich bei der Problemstellung „Gartengrill“ im Mittel folgende Differenzen: 0,42 (SD = .96) für den Faktor „Psychophysischer Zustand“, 0,35 (SD = 1.11) für die Konzentration, 0,84 (SD = 1.32) für die Motivation und 0,67 (SD = 1.00) für die affektive Lage.

Eine einfaktorielle ANOVA erbrachte keinen signifikanten Gruppenunterschied (F_{ANOVA} = 1,497/1,138/2,064/2,769; $p > .05$). Die Tabelle 45 gibt einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte der psychischen Beanspruchung der drei Versuchsgruppen, aufgegliedert in die vier Faktoren.

Tab. 45: Psychische Beanspruchung der Versuchsgruppen: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Psychische Beanspruchung** (Differenz aus Prä- und Posttestwert) (MW ± SE)	
(1) Papier und Bleistift	Psychophysischer Zustand:	0,14 ± .16 (SD = .73)
	Konzentration:	0,05 ± .19 (SD = .89)
	Motivation:	0,43 ± .18 (SD = .86)
	Affektive Lage:	0,34 ± .19 (SD = .87)
(2) Graphiktablett	Psychophysischer Zustand:	0,62 ± .24 (SD = 1.14)
	Konzentration:	0,52 ± .21 (SD = 1.00)
	Motivation:	0,87 ± .27 (SD = 1.24)
	Affektive Lage:	0,66 ± .16 (SD = .77)
(3) 2D-CAD	Psychophysischer Zustand:	0,50 ± .20 (SD = .94)
	Konzentration:	0,47 ± .30 (SD = 1.40)
	Motivation:	1,22 ± .36 (SD = 1.67)
	Affektive Lage:	1,03 ± .26 (SD = 1.22)

An dieser Stelle sei auf ein Ergebnis der mündlichen Nachbefragung hingewiesen, das sich auf die Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und mit Graphiktablett bezieht. Die Probanden, die bei der Problemstellung „Gartengrill" das Graphiktablett zur Lösungserarbeitung genutzt hatten, nannten mehrheitlich

- Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung gegenüber Papier (zu hoher Anstellwinkel des Geräts, Bildschirmoberfläche rauher, Aufsetzpunkt des Stifts ist nicht identisch mit dem Punkt des Strichbeginns, mangelnde Drucksensitivität des UltraPens etc.) und
- Verzögerungen zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung als negative Aspekte. Durch die verlangsamte Reaktionsgeschwindigkeit ergaben sich vor allem Behinderungen beim Schreiben auf der Bildschirmoberfläche.

8.8.4 Ergebnisse zur Fragestellung 3: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Prozesses

Hinsichtlich der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten" ergab eine einfaktorielle MANOVA bei der Problemstellung „Gartengrill" mindestens zwischen zwei der drei Versuchsgruppen hochsignifikante Unterschiede ($F_{MANOVA} = 3{,}551$; $p < .001$).

Die Ergebnisse der univariaten Analysen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Die Darstellung der Ergebnisse des Extremgruppenvergleichs zur Variable „Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte" und der Ergebnisse zur Variable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen" erfolgt deskriptiv in den Abschnitten 8.8.4.2 und 8.8.4.3.

8.8.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Bezogen auf die Gesamtstichprobe (N = 66) gestalteten sich die Prozentanteile für die im Rahmen der Lösungserarbeitung ausgeführten Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit beim Entwurfsproblem „Gartengrill" wie in der Tabelle 46 dargestellt:

Tab. 46: Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Gesamtstichprobe an der Bearbeitungszeit (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Teiltätigkeit	**Anteil an der Bearbeitungszeit** (in %) (MW $\pm$ SE der relativen Häufigkeiten)
Aufgabenstudium	8,1 (0,081) $\pm$ .51 (SD = 4.16)
Skizzieren bzw. Zeichnen	36,7 (0,367) $\pm$ 1.46 (SD = 11.83)
Notieren	7,0 (0,070) $\pm$ .96 (SD = 7.77)
Betrachten	38,8 (0,388) $\pm$ 1.18 (SD = 9.62)
Radieren bzw. Löschen	3,2 (0,032) $\pm$ .35 (SD = 2.80)
Keine sichtbare Aktivität	6,1 (0,061) $\pm$ .84 (SD = 6.79)

Bezogen auf die prozentualen Anteile der Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit zeigte ein varianzanalytischer Vergleich signifikante bzw. hochsignifikante Gruppenunterschiede bei den Teiltätigkeiten „Aufgabenstudium“ (F_{ANOVA} = 3,104; p = .05), „Skizzieren bzw. Zeichnen“ (F_{ANOVA} = 16,345; p < .001), „Notieren“ (F_{ANOVA} = 9,632; p < .001), „Betrachten“ (F_{ANOVA} = 3,159; p < .05) und „Radieren bzw. Löschen“ (F_{ANOVA} = 3,629; p < .05). Kein signifikanter Gruppenunterschied ergab sich bei der Teiltätigkeit „Keine sichtbare Aktivität“ (F_{ANOVA} = ,025; p > .05).

In Einzelvergleichen unterschieden sich die Teilnehmer der ersten Versuchsbedingung bei den Teiltätigkeiten „Aufgabenstudium“, „Notieren“, „Betrachten“, „Radieren bzw. Löschen“ und „Keine sichtbare Aktivität“ nicht signifikant von den Versuchspersonen der zweiten Bedingung (jeweils $p_{1/2} > .05$). Bei der Teiltätigkeit „Skizzieren bzw. Zeichnen“ ergab sich hingegen ein signifikanter Unterschied ($p_{1/2} < .05$): Mit einem durchschnittlichen Prozentanteil von 36,2 % skizzierten die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, signifikant mehr als die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen. Deren Skizzieranteil entsprach 28,5 % der Bearbeitungszeit.

Beim Vergleich der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen mit den rechnergestützt entwerfenden Versuchspersonen zeigten sich folgende Ergebnisse: Beim Aufgabenstudium unterschieden sich die Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, signifikant von den mit AutoCAD Entwerfenden. Erstere lasen mit einem prozentualen Anteil von 9,2 % an der Bearbeitungszeit - verglichen mit 6,4 % - signifikant länger in der Problemstellung ($p_{2/3} < .05$). Die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift Ent-

werfenden unterschieden sich mit einem Anteil von 8,8 % diesbezüglich nicht signifikant von den Probanden, die rechnergestützt entwarfen ($p_{1/3} > .05$).

Hinsichtlich der Teiltätigkeit „Skizzieren bzw. Zeichnen“ erbrachte die ANOVA signifikante Unterschiede zwischen allen drei Versuchsgruppen. Den geringsten Skizzieranteil mit 28,5 % zeigten die Probanden der Untersuchungsbedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“, gefolgt von den Probanden der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ mit 36,2 %. Die rechnergestützt Entwerfenden zeichneten mit einem Anteil von durchschnittlich 45,3 % hochsignifikant bzw. signifikant länger als die Teilnehmer der beiden ersten experimentellen Bedingungen ($p_{2/3} < .01$ bzw. $p_{1/3} < .05$).

Beide durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen wichen in ihrem Prozentanteil für die Teiltätigkeit „Notieren“ hochsignifikant von den mit AutoCAD entwerfenden Teilnehmern ab ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .01$). Die Versuchsgruppen (1) und (2) schrieben durchschnittlich 8,8 % bzw. 10,4 % der Bearbeitungszeit, wohingegen das Notieren von Text bei der dritten Gruppe im Mittel nur 1,8 % der Zeit in Anspruch nahm.

Im Hinblick auf das Betrachten der Skizze bzw. Zeichnung ließ sich zwischen den durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett und den rechnergestützt entwerfenden Probanden ein signifikanter Unterschied feststellen ($p_{2/3} < .05$). Erstere nutzten im Mittel 42,7 % ihrer Bearbeitungszeit zum Betrachten des erstellten Entwurfs, während die Versuchspersonen, die mit AutoCAD entwarfen, darauf nur 35,9 % ihrer Zeit verwendeten. Die Probanden, die das Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ zur Verfügung hatten, betrachteten ihre Skizze(n) mit einem durchschnittlichen Prozentanteil von 37,8 % und unterschieden sich damit statistisch von keiner der beiden anderen Gruppen ($p_{1/2}$ und $p_{1/3} > .05$)

Bezogen auf die Teiltätigkeit „Radieren bzw. Löschen“ unterschieden sich die Versuchsgruppen (1) und (2) signifikant von den Probanden der dritten experimentellen Bedingung ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .05$). Die Probanden, die mit AutoCAD entwarfen, löschten mit einem Prozentwert von 4,5 % - verglichen mit 2,5 bzw. 2,7 % - anteilig signifikant mehr an der Bearbeitungszeit.

Bezogen auf die Teiltätigkeit „Keine sichtbare Aktivität“, die sich durch Umherblicken oder In-die-Luft-Schauen äußerte, zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsgruppen ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} > .05$). Die entsprechenden Prozentanteile betrugen im Mittel 5,9 %, 6,4 % bzw. 6,0 % an der Bearbeitungszeit.

Die Tabelle 47 dokumentiert die deskriptiven Kennwerte für die Anteile der Teiltätigkeiten der einzelnen experimentellen Bedingungen an der Bearbeitungszeit.

Tab. 47: Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen an der Bearbeitungszeit (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Anteile der Teiltätigkeiten** (in %) (MW ± SE der relativen Häufigkeiten)
(1) Papier und Bleistift	Aufgabenstudium: 8,8 (0,088) ± 1.05 (SD = 4.93)
	Skizzieren bzw. Zeichnen: 36,2 (0,362) ± 2.11 (SD= 9.88)
	Notieren: 8,8 (0,088) ± 1.61 (SD = 7.54)
	Betrachten: 37,8 (0,378) ± 2.11 (SD = 9.90)
	Radieren bzw. Löschen: 2,5 (0,025) ± .61 (SD = 2.88)
	Keine sichtbare Aktivität: 5,9 (0,059) ± 1.27 (SD = 5,95)
(2) Graphiktablett	Aufgabenstudium: 9,2 (0,092) ± .82 (SD = 3.85)
	Skizzieren bzw. Zeichnen: 28,5 (0,285) ± 1.45 (SD = 6.80)
	Notieren: 10,4 (0,104) ± 1.86 (SD = 8.73)
	Betrachten: 42,7 (0,427) ± 1.95 (SD = 9.16)
	Radieren bzw. Löschen: 2,7 (0,027) ± .46 (SD = 2.14)
	Keine sichtbare Aktivität: 6,4 (0,064) ± .84 (SD = 6.79)
(3) 2D-CAD	Aufgabenstudium: 6,4 (0,064) ± .66 (SD = 3.10)
	Skizzieren bzw. Zeichnen: 45,3 (0,453) ± 2.54 (SD = 11.89)
	Notieren: 1,8 (0,018) ± .68 (SD = 3.19)
	Betrachten: 35,9 (0,359) ± 1.89 (SD = 8.86)
	Radieren bzw. Löschen: 4,5 (0,045) ± .64 (SD = 2.99)
	Keine sichtbare Aktivität: 6,0 (0,060) ± 1.73 (SD = 8.11)

Bezogen auf die Gesamtstichprobe (N = 66) gestikulierten 48 (72,7 %) bei der Lösungserarbeitung des Gartengrills, während sich nur 25 (37,9 %) verbal äußerten.

Von den durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwerfenden Probanden gestikulierten 20 (90,9 %) (s. Tabelle 48); von den Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren mit einem Graphiktablett entwarfen, 17 (73,3 %). Es äußerten sich 12 (54,5 %) bzw. 8 (36,4 %) der jeweils 22 Probanden verbal.

Bei der dritten Gruppe gestikulierten mit 11 der 22 Probanden (50,0 %) deutlich weniger im Vergleich zu den beiden ersten experimentellen Bedingungen. Auch der Prozentsatz derer, die sich während der Bearbeitung der Problemstellung verbal äußerten, war mit 22,7 % (5 Vpn) bei den mit AutoCAD entwerfenden Probanden am geringsten ausgeprägt.

Tab. 48: Anteile der während der Lösungserarbeitung gestikulierenden und sprechenden Probanden pro Versuchsgruppe (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Gestikulierende Probanden** (in %)	**Sprechende Probanden** (in %)
(1) Papier und Bleistift	90,9	54,5
(2) Graphiktablett	73,3	36,4
(3) 2D-CAD	50,0	22,7

Hinsichtlich der Abfolgen der Teiltätigkeiten wurden Wechsel zwischen dem Aufgabenstudium in Form des Lesens und externen (Skizzieren bzw. Zeichnen, Notieren, Radieren bzw. Löschen) sowie internen Teiltätigkeiten (Betrachten, keine sichtbare Aktivität) erfasst. Zusätzlich interessierten die Wechsel zwischen externen und internen Teiltätigkeiten. Die Anzahl der Wechsel war vor der Durchführung einer einfaktoriellen ANOVA in Bezug zur benötigten Bearbeitungszeit gesetzt worden.
Die Gesamtstichprobe (N = 66) vollzog beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ im Mittel pro Stunde 9,4 Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“, 5,0 Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ und 137,0 Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“.

Eine einfaktorielle ANOVA erbrachte keinen signifikanten Gruppenunterschied im Bezug auf die Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ (F_{ANOVA} = ,847; $p > .05$); im Hinblick auf die Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ (F_{ANOVA} = 4,898; $p < .05$) und „Externe – interne Teiltätigkeit“ (F_{ANOVA} = 4,378; $p < .05$) ergaben sich signifikante Gruppenunterschiede.
Zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit einem Graphiktablett entwarfen, zeigten sich in Einzelvergleichen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Abfolgen der Teiltätigkeiten in Form der verschiedenen Wechsel (jeweils $p_{1/2} > .05$).
Im Hinblick auf alle drei Versuchsgruppen ergab sich in folgendes Bild: Bezogen auf die Anzahl der Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ ergaben sich keine signifikanten Unterschiede ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} > .05$).
Hinsichtlich der durchgeführten Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und den rechnergestützt entwerfenden Teilnehmern ($p_{1/3} < .05$): Die Probanden der Versuchsgruppe (1) wechselten diesbezüglich im Mittel 6,8 mal pro Stunde, wohingegen bei den rechnergestützt Entwerfenden nur 3,4 Wechsel verzeichnet werden konnten. Kein signifikanter Unterschied ergab sich zwischen der durch Freihandskizzieren mit Gra-

phiktablett entwerfenden Versuchsgruppe und den Probanden, die mit AutoCAD entwarfen ($p_{2/3} > .05$).

Bezogen auf die Anzahl der Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“ unterschieden sich die Versuchsgruppen (1) und (2) signifikant von den rechnergestützt Entwerfenden ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .05$): Hier wiesen letztere 95,9 Wechsel pro Stunde auf, im Gegensatz zu 160,9 bzw. 154,3 Wechseln der beiden ersten Gruppen.

Die deskriptiven Kennwerte für die Abfolgen der Teiltätigkeiten der drei Versuchsgruppen in Form der verschiedenen Wechsel fasst die Tabelle 49 zusammen.

Tab. 49: Abfolgen der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	**Abfolgen der Teiltätigkeiten** (Anzahl der Wechsel pro Stunde) (MW $\pm$ SE der absoluten Häufigkeiten)
(1) Papier und Bleistift	Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit: 8,2 $\pm$ 2.08 (SD = 4.93) Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit: 6,8 $\pm$ .99 (SD = 4.66) Externe – interne Teiltätigkeit: 160,9 $\pm$ 19.2 (SD = 90.07)
(2) Graphiktablett	Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit: 13,03 $\pm$ 4.74 (SD = 22.25) Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit: 4,8 $\pm$ .77 (SD = 3.6) Externe – interne Teiltätigkeit: 154,3 $\pm$ 10.95 (SD = 51.35)
(3) 2D-CAD	Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit: 7,0 $\pm$ 3.04 (SD = 14.25) Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit: 3,4 $\pm$ .44 (SD = 2.06) Externe – interne Teiltätigkeit: 95,9 $\pm$ 19.74 (SD = 92.59)

8.8.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Die Anteile der verschiedenen Entwurfsschritte und ihre Abfolgen wurden aufgrund der aufwendigen, zu erprobenden Auswertungsprozedur in einem Extremgruppenvergleich betrachtet. Dazu wurden von den 66 Teilnehmern der Gesamtstichprobe unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel die drei mit den höchsten Werten für die Lösungsgüte und den kürzesten Bearbeitungszeiten sowie mit den geringsten Werten für die Lösungsgüte und den längsten Bearbeitungszeiten ausgewählt.

Die drei Versuchspersonen 44, 51 und 54 der Extremgruppe mit den höchsten Werten für die Lösungsgüte und den kürzesten Bearbeitungszeiten hatten den Gartengrill allesamt durch Freihandskizzieren entworfen - zwei von ihnen mit Graphiktablett und ein Teilnehmer mit Papier

und Bleistift. Sie tätigten durchschnittlich 487 Schritte bis zur Fertigstellung der Entwurfslösung; das entspricht im Mittel 10,8 Schritten pro Minute.

Die drei Versuchspersonen 19, 43 und 47 der zweiten Extremgruppe mit den geringsten Werten für die Lösungsgüte und den längsten Bearbeitungszeiten hatten hingegen alle rechnergestützt entworfen. Hier betrug die mittlere Gesamtschrittanzahl 656 Schritte; das sind durchschnittlich 6,4 Schritte pro Minute.

Die Tabelle 50 gibt einen Überblick über die Probanden des Extremgruppenvergleichs sowie deren Lösungsgütewert, Bearbeitungszeit und Gesamtschrittanzahl.

Tab. 50: Extremgruppenvergleich: Lösungsgütewert, Bearbeitungszeit und Gesamtschrittanzahl der Probanden (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

	Höchste Lösungsgütewerte und kürzeste Bearbeitungszeiten			**Geringste Lösungsgütewerte und längste Bearbeitungszeiten**		
	Vp 44 Papier und Bleistift	Vp 51 Graphik-tablett	Vp 54 Graphik-tablett	Vp 19 CAD	Vp 43 CAD	Vp 47 CAD
Lösungsgüte (in %)	86,3	97,2	93,3	0	0	0
Bearbeitungszeit (in Min.)	49	37	49	104	100	105
Gesamtschrittanzahl (absolute Häufigkeiten)	667	401	393	708	496	764
Gesamtschrittanzahl (relative Häufigkeiten: Schritte pro Min.)	13,6	10,8	8,0	6,9	5,0	7,3

Hinsichtlich der prozentualen Anteile der einzelnen Entwurfsschritte an der Gesamtschrittanzahl zeigte sich in der ersten Extremgruppe ein recht einheitliches Bild (s. Tabelle 51). Am häufigsten wurden von allen drei Versuchspersonen mit einem mittleren Anteil von 33,2 % Bereitstellungsschritte ausgeführt, gefolgt von Generierungs- (22,6 %), Planungs- (13,3 %) und Anpassungsschritten (12,2 %). Kontrolliert und wiederholt wurde mit durchschnittlichen Anteilen von 9,3 und 7,1 % seltener. Am geringsten war der Anteil der Verwerfungsschritte mit 2,1 % im Schnitt.

Auch die Probanden der zweiten Extremgruppe unterschieden sich untereinander nicht wesentlich. Hier nahm das Bereitstellen mit durchschnittlich 38,2 % ebenfalls den größten Prozentanteil ein. Im Vergleich zur ersten Gruppe wurden jedoch mit durchschnittlich 16,8 und 15,1 % deutlich mehr Anpassungs- und Kontrollschritte getätigt. Auffallend war der hohe Anteil an

Verwerfungsschritten mit 10,9 % sowie der vergleichsweise niedrige Anteil an Generierungs- und Planungsschritten mit 9,7 und 4,3 % im Mittel.

Tab. 51: Extremgruppenvergleich: Prozentuale Anteile der Entwurfsschritte an der Gesamtschrittanzahl (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

	Höchste Lösungsgütewerte und kürzeste Bearbeitungszeiten			**Geringste Lösungsgütewerte und längste Bearbeitungszeiten**		
	Vp 44 Papier und Bleistift	Vp 51 Graphik-tablett	Vp 54 Graphik-tablett	Vp 19 CAD	Vp 43 CAD	Vp 47 CAD
Planung (P)	15,1	10,2	14,5	4,8	5,2	2,9
Bereitstellung (B)	34,9	34,4	30,4	41,8	34,3	38,5
Generierung (G)	18,0	21,4	28,4	6,4	12,5	10,3
Kontrolle (K)	12,7	7,5	7,8	18,5	14,5	12,4
Verwerfung (V)	0,8	2,5	3,0	10,2	12,7	9,8
Anpassung (A)	9,7	15,5	11,5	13,6	16,1	20,7
Wiederholung (W)	8,5	8,5	4,4	4,8	4,6	5,4

Um die Unterschiede im Bezug auf die Abfolgen der Entwurfsschritte zwischen den beiden Extremgruppen aufzuzeigen, sollen exemplarisch zeitlich vergleichbare Ausschnitte aus den Protokollen der Versuchspersonen 44 und 19 gegenübergestellt werden, welche für die jeweilige Gruppe charakteristisch sind.

Die Abbildung 7 zeigt die erste Fünf-Minuten-Sequenz der Versuchsperson 44, die den Gartengrill durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarf und einen sehr hohen Wert für die Lösungsgüte in einer kurzen Bearbeitungszeit erzielte. Die Buchstaben entsprechen dabei den einzelnen Entwurfsschritten (vgl. Tabelle 51).

1. Sequenz: Minute 1 bis 5

P / B / **G** / **P** / **G** / **P** / B / **G** / **P** / **G** / **P** / B / **G** / **P** / B / **G** / **P** / B / **G** / A / **P** / B / **G** / B / **G** / B / **G** / B / A / **P** / **G** / **P** / B / W / B / W / K / B / W / K / A / W / K / B / A / B / **G** / K / B / **P** / B / **G** / A / **G** / **P** / B / **G** / B / **G** / **P** / B / **G** / P / B / **G** / **P** / **G** / W / K / B / W / K / A //

Abb. 7: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 44: 1. Sequenz (Minute 1 bis 5) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Auffallend ist das häufige Generieren mit vorangehenden Planungsphasen. Nach einer ersten Redefinition der Problemstellung beginnt die Person 44 mit der Handlungsausführung, dem

Skizzieren. In der Folge wechseln sich Phasen des Planens, die sich etwa im Betrachten der bisherig erstellten Skizzierelemente äußern, mit einem anschließenden Generieren ab. Zwischen diesen beiden Schritten führt die Person Bereitstellungen zur Handlungsvorbereitung aus; sie deutet z. B. durch Handbewegungen eine Linie an oder dreht das Papier.
Die in der zweiten Zeile gehäuft vorkommenden Wiederholungen beziehen sich auf materialisierende Aktivitäten, die – meist nach einer mentalen Handlungskontrolle - bereits vorhandene, externalisierte Lösungsansätze erneut aufgreifen und erläutern, indem Teilfunktionen beschriftet werden etc.
Anpassungen und Verwerfungen aus Resultatsrückmeldungen finden bei diesem Probanden zu Beginn der Lösungserarbeitung eher selten bzw. gar nicht statt. Diese Tatsache lässt auf eine stringente Handlungsführung schließen, die durch die Möglichkeit des raschen, intuitiven Externalisierens der kognitiven Planungsergebnisse bedingt und gefördert wird.

In der Abbildung 8 sind die ersten beiden Sequenzen der Versuchsperson 19 dargestellt. Diese gehört der zweiten Extremgruppe an und hat den Gartengrill mit AutoCAD entworfen.

1. Sequenz: Minute 1 bis 5

B / **P** / B / **G** / **V** / K / B / B / **V** / B / **G** / K / B / **A** / B / **G** / B / **V** / B / **G** / B / W / B / K / **A** / **A** / B / **A** / K / B //

2. Sequenz: Minute 6 bis 10

A / B / K / B / **A** / B / **A** / B / K / B / **A** / B / **A** / B / **A** / B / **V** / K / B / **V** / B / **V** / B / **V** / B / W / B / **A** / B / K / B / **A** / K / **V** / B / P / B / **G** //

Abb. 8: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 19: 1. und 2. Sequenz (Minute 1 bis 10) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Zunächst einmal fällt die deutlich geringere Anzahl an Entwurfsschritten innerhalb der Zeiteinheiten ins Auge. Das korrespondiert mit dem oben genannten Zahlenwert für die Gesamtschrittanzahl, der bei den rechnergestützt Entwerfen im Mittel pro Minute 3,5 Schritte weniger betrug. Da die Zeiteinheiten mit jeweils fünf Minuten identisch sind, kann von einer durchschnittlich längeren Dauer einzelner Entwurfsschritte ausgegangen werden. In der ersten Sequenz betrifft das vor allem das Planen.
Die Versuchsperson 19 vollzieht im Gegensatz zur Person 44 deutlich weniger Generierungsschritte in den ersten fünf Minuten der Problembearbeitung. Es findet sich auch nur eine einzige Planungsphase. Die Aktivitäten bestehen nach erfolgter Handlungskontrolle mehrheitlich aus Anpassungen und Verwerfungen. Eine Anpassung bezieht sich dabei auf einen bestimmten

Teil des Entwurfs, der erhalten bleibt und nur hinsichtlich Länge, Breite u. s. w. verändert wird. Eine Verwerfung betrifft ein „gegenständliches“ Zwischenprodukt oder einen auf ein Teilziel bezogenen Plan.

Die im folgenden abgebildete achte Sequenz (Minute 36 bis 40) der durch Freihandskizzieren entwerfenden Person 44 zeigt, dass das Wechselspiel aus internalem und externalem Handeln in Form des Planens und Generierens beim Entwerfen durch Freihandskizzieren auch in den fortgeschrittenen Stadien der Lösungserarbeitung weiter anhält. Dazwischen finden sich in der Regel Bereitstellungsschritte. Die Anzahl der Anpassungen hat sich im Vergleich zur ersten Sequenz nicht wesentlich vergrößert.

8. Sequenz: Minute 36 bis 40

K / B / A / B / **P** / B / **G** / **P** / B / **G** / **P** / B / **G** / B / A / B / **P** / B / **G** / B / A / B / **G** / **P** / B / **G** / K / B / **P** / B / **G** / B / A / **P** / B / **G** / B / A / B / **P** / B / **G** / K / B / A / **P** / B / **G** / **P** / B / **G** / **P** / B / **G** / K / B / A / K / B / A / **P** / B / **G** / **P** / B / G / **P** / B / **G** //

Abb. 9: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 44: 8. Sequenz (Minute 36 bis 40) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Die rechnergestützt entwerfende Person 19 führt in den Sequenzen 13 und 14, die mit der eben vorgestellten Sequenz im Bezug auf den Bearbeitungsfortschritt zeitlich vergleichbar sind, wiederum wesentlich weniger Entwurfsschritte aus als die Person 44. Im Gegensatz dazu wird hier in den Denkphasen ausschließlich kontrolliert. Neben der „mentalen“ Kontrolle finden auch „gegenständliche“ Kontrollen durch die Nutzung der Möglichkeiten des Arbeitsmittels „Auto-CAD“ statt. Anschließend werden die existierenden Entwurfselemente hauptsächlich angepasst. Generiert wird zu diesen Entwurfszeitpunkten nahezu gar nicht mehr.

13. Sequenz: Minute 61 bis 65

K / B / **A** / B / **A** / **K** / B / **A** / **K** / B / **A** / B / **K** / **A** / B / **A** / **K** / B / B / **A** / **K** / B / **A** / **K** / B / **A** / B / **A** / B / **A** / **K** / B / **K** / B / **A** //

14. Sequenz: Minute 65 bis 70

K / B / **A** / **K** / B / **K** / B / B / **K** / B / **A** / B / **A** / **K** / B / B / W / B / W / B / **A** / **K** / B / **K** / V / B / **A** / B / G / **K** / B / **A** / K / B / **A** / B / **A** / B / V / **K** / B / **A** //

Abb. 10: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 19: 13. und 14. Sequenz (Minute 61 bis 70) (N = 6; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

8.8.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Betrachtet man die Gesamtstichprobe (N = 66), so generierten 21 Probanden (31,8 %) bei der Problemstellung „Gartengrill“ zu Beginn Alternativen: 14 davon (21,2 %) beim Hauptprinzip, ein Teilnehmer (1,5 %) bei Teilprinzipien und sechs (9,1 %) sowohl beim Hauptprinzip als auch bei Teilprinzipien. Die Probanden erzeugten die Lösungsvarianten divergierend und in der Regel zunächst auf einem relativ abstrakten Niveau. Danach engten sie die Lösungsvielfalt – im Sinne einer ausgewogenen Suchraumgestaltung (vgl. Fricke, 1993) - konvergierend, hauptsächlich mittels der korrigierenden Variation ein, wobei der Konkretisierungsgrad stetig zunahm. Die Anzahl der zu Beginn entwickelten Lösungsmöglichkeiten betrug bei der Gesamtstichprobe im Mittel 2,0 und dabei ausschließlich bezogen auf die generierend vorgehenden Probanden ≈ 4.

Von den 22 Probanden, die den Gartengrill durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, gingen 12 generierend (54,5 %) vor: Acht (36,4 %) generierten Alternativen beim Hauptprinzip, vier (18,2 %) sowohl beim Hauptprinzip als auch bei Teilprinzipien. Die gesamte Versuchsgruppe (1) zog zu Beginn durchschnittlich 3,0 Lösungsmöglichkeiten in Betracht; die davon generierend vorgehenden Probanden entwarfen zu Beginn ≈ 5 Möglichkeiten, bevor sie sich entschieden.

Von den 22 Versuchspersonen der zweiten experimentellen Bedingung, die den Gartengrill durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, zeigten neun (40,9 %) ein generierendes Vorgehen bei der Lösungserzeugung. Sechs (27,3 %) betrachteten beim Hauptprinzip mindestens zwei Lösungen gleichzeitig, ein Proband (4,5 %) bei Teilprinzipien und zwei (9,0 %) sowohl beim Hauptprinzip als auch bei Teilprinzipien. Von der gesamten zweiten Versuchsgruppe wurden im Schnitt ≈ 2 Lösungsmöglichkeiten entwickelt; von der Teilgruppe der generierend vorgehenden Teilnehmer ≈ 4.

Im Gegensatz zu den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden gingen die Versuchpersonen, die den Gartengrill mit AutoCAD entwarfen, ausschließlich korrigierend vor. Keine der rechnergestützt entwerfenden Personen generierte zu Beginn mehr als eine Lösungsmöglichkeit. Damit unterschied sich die dritte Versuchsgruppe sowohl im Bezug auf die Häufigkeit des generierenden Vorgehens als auch auf die Anzahl der dabei generierten Lösungen auffällig von den Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen.

Die Tabelle 52 zeigt die deskriptiven Kennwerte für das generierende Vorgehen der drei Versuchsgruppen bei der Lösungserzeugung.

Tab. 52: Lösungserzeugung: generierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	Generierendes Vorgehen (in %)	Gesamtanzahl der zu Beginn entwickelten Varianten (MW $\pm$ SE)	Zu Beginn entwickelte Varianten der generierend Vorgehenden (MW)
(1) Papier und Bleistift	54,6	3,0 $\pm$ .67 (SD = 3.12)	4,6
(2) Graphiktablett	40,9	2,1 $\pm$ .41 (SD = 1.93)	3,8
(3) 2D-CAD	0	1,0 $\pm$ .00 (SD = 0)	-

Bezogen auf die Gesamtstichprobe (N = 66) zeigten 45 Probanden (68,2 %) beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ eine ausschließlich korrigierende Vorgehensweise. Davon betrachteten sieben Probanden durch korrigierendes Vorgehen nacheinander unterschiedliche Lösungsvarianten, die unabhängig von den vorherigen Lösungen jeweils komplett neu entwickelt wurden. Jeweils zwei der sieben erstellten nacheinander zwei, drei und vier Lösungen, ein Teilnehmer fünf Lösungen.

Unter der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ zeigten zehn Teilnehmer (45,4 %) ein ausschließlich korrigierendes Vorgehen. In der zweiten experimentellen Bedingung wiesen 13 Probanden (59,1 %) eine korrigierende Vorgehensweise auf.

Von den oben erwähnten sieben Probanden der Gesamtstichprobe, die nacheinander durch korrigierendes Vorgehen Lösungsvarianten entwickelten, entstammten vier (18,2 %) der Versuchsgruppe (1). Zwei davon erstellten zwei, ein Teilnehmer drei und einer vier Varianten. Die anderen drei (13,6 %) gehörten zur Versuchsgruppe (2). Sie entwickelten nacheinander korrigierend drei, vier bzw. fünf Varianten. Somit unterschieden sich die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, weder hinsichtlich der Häufigkeit des korrigierenden Vorgehens noch bezogen auf die Häufigkeit des nacheinander korrigierenden Vorgehens und die Anzahl der dabei erzeugten Lösungen auffällig von denjenigen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen.

Die rechnergestützt Entwerfenden gingen zu 100 % korrigierend vor und entwickelten auch nacheinander in korrigierender Weise keine Lösungen.

Die deskriptiven Kennwerte für das korrigierende Vorgehen der drei Versuchsgruppen bei der Lösungserzeugung sind in der Tabelle 53 überblicksartig dargestellt.

Tab. 53: Lösungserzeugung: korrigierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Hauptuntersuchung: Entwurfsproblem „Gartengrill“)

Experimentelle Bedingung	Korrigierendes Vorgehen (in %)	Nacheinander korrigierendes Vorgehen (in %)	Nacheinander korrigierend entwickelte Varianten der nacheinander korrigierend Vorgehenden (MW)
(1) Papier und Bleistift	45,4	18,2	2,8
(2) Graphiktablett	59,1	13,6	4,0
(3) 2D-CAD	100,0	0	-

8.9 Interpretation der Ergebnisse: Entwurfsproblem „Gartengrill“

Die vorrangige Zielstellung dieser Arbeit war es, zu prüfen, ob sich bei einem Einsatz der verschiedenartigen Arbeitsmittel in den frühen Entwurfsphasen statistisch bedeutsame Unterschiede in den Bewertungsbereichen „Ergebnisse“, „Erleben“ und „Prozess“ zeigen lassen. Im folgenden sollen die eben dargestellten Ergebnisse zur Problemstellung „Gartengrill“ zusammengefasst, interpretiert und integrativ betrachtet werden, um daraus Aussagen über das Unterstützungspotential der Arbeitsmittel ableiten zu können.

8.9.1 Homogenisierungsvariablen

Zusammenfassend ließen sich bei der Problemstellung „Gartengrill“ zwischen den Teilnehmern der drei experimentellen Bedingungen keine bedeutsamen Unterschiede hinsichtlich der Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung sowie der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung zeigen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss dieser personalen Kovariablen auf die abhängigen Variablen in den einzelnen Versuchsgruppen konstant, und deren Vergleichbarkeit für die weitere Untersuchung somit gewährleistet war.

8.9.2 Bereich der Ergebnisse

Im Rahmen der experimentellen Hauptuntersuchung wurde gefragt, ob sich die Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett“ und „Rechnergestütztes Entwerfen“ in den frühen Entwurfsphasen im Hinblick auf die Ergebnisvariablen „Lösungsgüte“, „Bearbeitungszeit“ sowie „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts“ signifikant voneinander unterscheiden.

Die Teilnehmer der Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ und „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ unterschieden sich weder signifikant in der Güte ihrer konstruktiven Lösungen, in der benötigten Bearbeitungszeit noch in der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts ihrer Entwürfe im Hinblick auf die Empfängergruppen „Technischer Laie“ und „Experte“. Die Hypothesen 1.1a, 1.2a und 1.3a konnten somit bestätigt werden.
Die Vergleichbarkeit der durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und mit Graphiktablett entwerfenden Probanden hinsichtlich der Ergebnisvariablen belegt die Gleichartigkeit der wesentlichen Anforderungen dieser beiden Arbeitsmittel an den Nutzer (vgl. Kapitel 4).

Verglichen mit der dritten Untersuchungsgruppe ergaben sich folgenden Resultate:
Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen, erzielten eine hochsignifikant höhere Lösungsgüte als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Damit ließ sich die Teilhypothese 1.1b bestätigen.
Dieses Ergebnis zeigt, dass das rechnergestützte Entwerfen zur Lösungsfindung in den frühen Phasen weniger gut geeignet war. Die Tätigkeit des Entwerfens als Design Problem Solving stellte Anforderungen an den Nutzer, die das Arbeitsmittel „2D-CAD“ nicht oder nicht ausreichend unterstützte. Im Gegenteil belastete es durch die vorgeschriebene, wenig intuitive Systemlogik das Arbeitsgedächtnis des Entwerfenden. Mentalkapazität, die eigentlich zur Erarbeitung der konstruktiven Lösung benötigt worden wäre, ging dadurch verloren.
Die mentalen Repräsentationen, die der Entwerfende im Verlauf der Lösungsfindung vom zu entwerfenden Objekt aufbaute, scheinen nicht mit den Bedienoperationen kompatibel gewesen zu sein. Der Abstraktionsgrad der Repräsentationen änderte sich je nach dem Stand der Bearbeitung der Gesamtkonstruktion und einzelner Teilelemente. Zu Beginn des Entwurfsprozesses existierte nur eine vage Vorstellung von dem zu konstruierenden Produkt, die mit dem Fortschreiten der Problembehandlung zunehmend konkretisiert wurde. Beim Entwerfen mit AutoCAD mussten jedoch bereits bei der Ersteingabe sämtliche quantitativen Festlegungen exakt getroffen werden. Wechsel im Abstraktionsgrad der Darstellung waren ausgeschlossen. Die dadurch vor allem in diesen frühen Abschnitten defizitäre Unterstützung des Entwurfsprozesses führte zu geringeren Wertigkeiten der konstruktiven Lösungen.

Bezüglich der Bearbeitungsdauer konnte man die Teilhypothese 1.2b bestätigen: Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren entwarfen, benötigten hochsignifikant weniger Zeit zur Bearbeitung der Problemstellung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen.

Zur Interpretation dieses Ergebnisses muss man die Erfordernisse der Bedienung bei CAD-Systemen betrachten. Hier war bereits bei der Ersteingabe eine halbwegs konkrete Vorstellung und quantitative Definition zumindest von Teilelementen des zu konstruierenden Objekts notwendig. Um zu dieser zu gelangen, traten bei den meisten Probanden zu Beginn längere Phasen des Nachdenkens, also ausschließlich mentaler Aktivität auf.
Die durch Freihandskizzieren entwerfenden Personen hingegen nutzten ihr Arbeitsmittel erheblich eher, um erste Ideen mit einem sehr geringen Konkretisierungsgrad zeichnerisch oder schriftlich festzuhalten. Die in Form von Skizzen und Notizen externalisierten Lösungsgedanken waren damit „gespeichert", wodurch ein Vergessen und zeitaufwendiges Nachgrübeln verhindert wurde. Diese frühen Skizzen dienten ebenso wie die Tätigkeit des Skizzierens an sich der Exploration verschiedener Lösungsmöglichkeiten und deren sofortiger Analyse und Funktionsüberprüfung. Fehler wurden dadurch bereits in einem sehr frühen Stadium erkannt und konnten ohne großen Aufwand behoben werden.
Sowohl die Funktion der Speicherhilfe als auch der Lösungs- und Analysehilfe bedürfen gerade zu Entwurfsbeginn der Möglichkeit einer raschen, intuitiven Externalisierung. Diese war beim Arbeitsmittel „CAD" nicht gegeben: Durch die fehlende Einheit von Seh- und Handlungsraum, die Notwendigkeit der Bereitstellung von Funktionalitäten in Form des Anklickens von Icons und durch die Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung wurde sowohl der Prozess der Darstellung als auch der Lösungserarbeitung erheblich verzögert.

Die Teilhypothese 1.3b zur Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der produzierten Entwürfe konnte bestätigt werden: Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen, erreichten hochsignifikant höhere Werte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts sowohl im Hinblick auf die Kooperation mit technischen Laien als auch mit Experten im Vergleich zu im Umgang mit CAD ausgebildeten Probanden, die rechnergestützt entwarfen.
Dieser Unterschied kann vorwiegend durch die mit den verschiedenartigen Arbeitsmitteln möglichen Arten der Darstellung erklärt werden. Die Arbeitsmittel „Papier und Bleistift" sowie „Graphiktablett" ermöglichten durch die individuelle Wahl hinsichtlich der Ebenen der drei Dimensionen „Inklusion", „Kohärenz" und „Präzision" (Ballay, 1987; vgl. Abschnitt 2.3.1) einen unproblematischen Wechsel des Abstraktionsgrads der Darstellung. Die Darstellung konnte hier zwei- oder dreidimensional erfolgen, je nachdem was der Bearbeiter damit intendierte. Im Gegensatz dazu war bei AutoCAD ein Wechsel des Abstraktionsgrads unmöglich. Die Darstellung war von Beginn an gleichbleibend konkret und erfolgte wegen des geringeren Aufwands in aller Regel zweidimensional.

Ein Wechsel der Modalität vom Bildlichen in das Begriffliche war beim Entwerfen durch Freihandskizzieren ohne Zusatzaufwand möglich, so dass die Skizzen häufig mit Anmerkungen versehen wurden, die das Dargestellte verdeutlichten oder ergänzten. In den Entwürfen der rechnergestützt arbeitenden Probanden fanden sich dagegen eher selten Anmerkungen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das Eintippen von Text durch das erforderliche Vorgehen eine Mehrbelastung für den Nutzer bedeutet hätte.
Während sich beim Entwerfen durch Freihandskizzieren ohne weiteres Formen erzeugen ließen, die nicht der Geometrie von Bauteilen entsprachen, basierte das CAD-System auf einer geometrieorientierten Entwurfserstellung. Die durch Mausklick anwählbaren Formen umfassten hauptsächlich geometrische Elemente. Alle weiteren Formen ließen sich nur mit einem unverhältnismäßig hohen Bedienaufwand erzeugen.
Die umfangreicheren Darstellungsmöglichkeiten beim Freihandskizzieren erlaubten eine zutreffendere Interpretation des Inhalts vor allem durch technische Laien. Die fachspezifische „Sprache“ zum Verstehen der genormten Informationsträger rechnergestützt erstellter Entwürfe beherrschen diese zumeist nicht oder in nicht ausreichendem Maße. Während technische Experten einerseits in der Lage sind, derartige Darstellungen zu dekodieren, stellen sie andererseits höhere Forderungen an den Informationsgehalt. Um den Entwurf ohne die Gefahr von Fehlinterpretationen weiterbearbeiten zu können, sind detaillierte Angaben zu allen wesentlichen Elementen des Objekts notwendig. Dafür waren die darstellerischen Möglichkeiten bei AutoCAD unzureichend bzw. mit zuviel zeitlichem Aufwand und mentalen Belastungen verbunden.

Die Tatsache, dass die mit AutoCAD entwerfenden Probanden zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill“ deutlich mehr Zeit benötigten und dennoch bei weitem geringere Werte für die Lösungsgüte und die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts erreichten, zeigt, dass CAD den Nutzer bei der Bewältigung der durch das Design Problem Solving gestellten Anforderungen nicht ausreichend unterstützt hat. Das Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bot hingegen diesbezüglich ein vergleichbares Unterstützungspotential wie das Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett.

8.9.3 Bereich des Erlebens

Im Rahmen der experimentellen Hauptuntersuchung wurde gefragt, ob sich die Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett“ und „Rechnergestütztes Entwerfen“ in den frühen Entwurfsphasen im Hinblick auf die Variablen des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit“, „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit“ sowie „Psychische Beanspruchung“ signifikant voneinander unterscheiden.

Die entsprechenden Hypothesen 2.1a, 2.2a und 2.3a konnten bestätigt werden: Es existierten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und dem Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett bezogen auf die erlebte Problemschwierigkeit, die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit sowie die psychische Beanspruchung der Probanden.
Das vergleichbare Erleben dieser beiden Versuchsgruppen bezüglich der Problemstellung, der entwickelten Lösung und der psychischen Beanspruchung spricht für die Gleichartigkeit der Nutzungsbedingungen der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“. Als „digitales Papier“ war das Graphiktablett in seinen Bedieneigenschaften an das herkömmliche Skizzieren angelehnt. Die in der mündlichen Nachbefragung berichteten nachteiligen Aspekte hinsichtlich der Veränderung von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung und der Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung hatten keinen bedeutsamen negativen Einfluss auf die erhobenen Variablen des Erlebens. Durch eine ausgereiftere und komplexere Software dürfte sich der Verzögerungsproblematik und damit zusammenhängenden Aspekten, wie etwa der mangelnden Drucksensitivität des UltraPens, entgegenwirken lassen.

Bei einem Vergleich der drei Versuchsgruppen hinsichtlich der erlebten Problemschwierigkeit ließen sich wider Erwarten keine bedeutsamen Unterschiede feststellen. Die Versuchsteilnehmer, die durch Freihandskizzieren entwarfen, erlebten die Problemstellung nicht als signifikant weniger schwierig als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Die Teilhypothese 2.1b ließ sich folglich nicht bestätigen.
Dieses Ergebnis lässt mehrere Erklärungsmöglichkeiten zu. Zum ersten muss in Betracht gezogen werden, dass die beschriebenen hypothetischen Unterschiede des Arbeitsmittels „AutoCAD“ in seinen Anforderungen an den Nutzer eventuell nicht ausreichten, um eine Differenzierung hinsichtlich der Variable „Erlebte Problemschwierigkeit“ zu bedingen. Sowohl die Funktions- als auch die erforderliche Bedienweise ist bei CAD im Vergleich zum Freihandskizzieren jedoch völlig anders geartet. Die Eigenschaften von CAD decken sich kaum mit den Anforderungen, die das Entwerfen als Design Problem Solving an den Nutzer stellt. Etwaige mangelnde Anforderungsunterschiede werden daher als Begründung für die fehlenden signifikanten Unterschiede zwischen den drei Versuchsgruppen bezüglich der erlebten Problemschwierigkeit ausgeschlossen.
Eine zweite Erklärungsmöglichkeit für die nicht vorhandenen Unterschiede stellt das fehlende alternative Entwurfsproblem dar, mit dem die Schwierigkeit des vorliegenden Entwurfsproblems „Gartengrill“ hätte verglichen werden können. Die Probanden sollten den Schwierigkeitsgrad der Problemstellung einschätzen ohne eine aktuelle Vergleichsmöglichkeit an der

Hand zu haben. Eventuell nutzte ein Großteil der Stichprobe ohne Rücksicht auf das verwendete Arbeitsmittel bisherige, während des Studiums behandelte Problemstellungen als Vergleichsgrundlage. Dadurch sind Ergebnisverzerrungen nicht auszuschließen, d. h., diese Variable muss unter Vorbehalt betrachtet werden.
Weiterhin kann angenommen werden, dass die rechnergestützt entwerfenden Teilnehmer mit Schwierigkeiten während der Lösungserarbeitung konfrontiert waren, die auf den deutlich höheren Anforderungen des Arbeitsmittels „CAD“ an den Nutzer hinsichtlich des Arbeitsgedächtnisses, des Aufbaus mentaler Problemrepräsentationen und der Externalisierung beruhen. In der Folge sind vermutlich die im Abschnitt 2.2.1 angesprochenen kognitiven „Notfalloperationen“ und Fehlerfaktoren, wie z. B. das deklarative und prozedurale Vereinfachen, aufgetreten. Wird etwa die Mentalkapazität bereits durch die Programmbedienung erheblich belastet, kann eine Zentralreduktion des Problems auf wenige Einflussgrößen die Folge sein. Dies kann dazu geführt haben, dass der Entwerfende die Problemstellung gar nicht in ihrer Gänze betrachtet und essentielle Anforderungen beiseite gelassen hat. Die Schwierigkeit der Problemstellung wurde in der Folge unter Umständen unterschätzt. Diese Erklärungsmöglichkeit wird durch das deutlich schlechtere Abschneiden der rechnergestützt entwerfenden Teilnehmer bezogen auf die Lösungsgüte bekräftigt.

Auch bezogen auf die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit zeigten sich entgegen der Teilhypothese 2.2b keine signifikanten Unterschiede zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden und im Umgang mit CAD ausgebildeten Versuchsteilnehmern, die rechnergestützt entwarfen. Erstere waren sich im Bezug auf die Richtigkeit ihrer Lösung nicht signifikant sicherer.
Bei der Erklärung dieses Sachverhalts soll auf den abschließend im Rahmen der erlebten Problemschwierigkeit diskutierten Punkt zurückgegriffen werden. Rechnergestützt Entwerfende waren sich eventuell vergleichbar sicher wie durch Freihandskizzieren entwerfende Probanden, da sie die Problemstellung für sich vereinfachten und – ohne sich dessen bewusst zu sein – nicht in allen Forderungen behandelten. Das Arbeitsmittel „CAD“ ließ eine adäquate Auseinandersetzung mit den gestellten Forderungen nicht in ausreichendem Maße zu.
Die Personen, die den Gartengrill durch Freihandskizzieren entwarfen, nutzten hingegen durch die Möglichkeit des raschen, intuitiven Arbeitens sowohl die Tätigkeit des Skizzierens selbst als auch die erstellte(n) Skizze(n) als Denkunterstützung und Analysehilfe. Es wird davon ausgegangen, dass die Probanden dadurch ein tiefergreifendes Verständnis des Problemausmaßes erlangten und in der Konsequenz eine vorsichtigere Einschätzung der Richtigkeit ihrer Lösung vornahmen. Die Ergebnisse zur Lösungsgüte belegen diese Aussage.

Die Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren entwarfen, erlebten weiter keine signifikant geringere psychische Beanspruchung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Die Teilhypothese 2.3b ließ sich somit nicht bestätigen.
Als Erklärung für dieses Ergebnis muss die Bearbeitungsdauer von maximal 120 Minuten herangezogen werden. Die zeitliche Nutzung des Arbeitsmittels „CAD“ war unter Umständen nicht ausreichend, um bei den Nutzern eine erhöhte psychische Beanspruchung nachzuweisen.
Zudem beruhen die mittels der verwendeten Ratingskalen gemachten Aussagen auf einer gänzlich subjektiven Einschätzung der Faktoren „Psychophysischer Zustand“, „Konzentration“, „Motivation“ und „Affektive Lage“. Um zu einer objektiven und aussagekräftigeren Erfassung der psychophysischen Beanspruchung zu gelangen, müssten in länger dauernden Versuchen zusätzlich psychophysiologische Parameter wie die Herzschlag- und Atemfrequenz erhoben werden.

8.9.4 Bereich des Prozesses

Im Rahmen der experimentellen Hauptuntersuchung wurde gefragt, ob sich die Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett“ und „Rechnergestütztes Entwerfen“ in den frühen Entwurfsphasen im Hinblick auf die Prozessvariablen „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten“, „Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte“ sowie „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen“ signifikant voneinander unterscheiden.

Bezogen auf die Anteile der während der Bearbeitung des Entwurfsproblems „Gartengrill“ ausgeführten Teiltätigkeiten zeigten sich zwischen den Teilnehmern, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und mit Graphiktablett entwarfen, mit Ausnahme der Teiltätigkeit „Skizzieren bzw. Zeichnen“ keine bedeutsamen Unterschiede. Die mit Papier und Bleistift entwerfenden Teilnehmer skizzierten bezogen auf die Bearbeitungszeit prozentual mehr.
In den Abfolgen der Teiltätigkeiten unterschieden sich die beiden Untersuchungsgruppen nicht signifikant voneinander. Damit ließ sich die Teilhypothese 3.1a mit der genannten Einschränkung bestätigen.
Die bis auf das Skizzieren gleichgearteten Anteile der Teiltätigkeiten sowie die Entsprechung ihrer Abfolgen in Form der verschiedenen Wechsel belegen, dass der Prozess des Entwerfens durch Freihandskizzieren mit den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ im Hinblick auf das äußere, beobachtbare Handeln vergleichbar ablief. Für den signifikant geringeren prozentualen Skizzieranteil der Probanden, die mit Graphiktablett entwarfen, sind zwei

Gründe denkbar. Erstens hatte keiner der Probanden dieses Arbeitsmittel bis auf eine zehnminütige Testphase vor Untersuchungsbeginn jemals verwendet. Die Gewöhnung an das Graphiktablett war somit verglichen mit Papier und Bleistift bedeutend geringer. Eventuell dauerte die Erkundung der Funktionalitäten des Geräts auch während der Bearbeitung der Problemstellung an, und die Versuchspersonen hielten sich infolgedessen mit dem externalen Handeln in Form des Skizzierens zurück.
Zweitens könnten geräteimmanente Aspekte für den auffallend geringeren Skizzieranteil verantwortlich sein. So wurden in der Nachbefragung von einigen Versuchspersonen Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung gegenüber Papier genannt: Der Anstellwinkel des Geräts war für eine entspannte Handhaltung beim Skizzieren und Schreiben auch in der niedrigsten Position zu hoch. Dadurch ließ sich das Gerät nicht entsprechend einem Blatt Papier drehen und behinderte den intuitiven Skizziervorgang. Einige wenige Personen monierten auch die Unterschiede in der Haptik der Bildschirmoberfläche; diese sei rauher als Papier, so dass der Stift nicht identisch gleite. Ferner entsprach der Aufsetzpunkt des Stifts bei der verwendeten Software *PenOffice* nicht genau dem Punkt des Strichbeginns, und die Drucksensitivität des UltraPens war eingeschränkt. Die Mehrzahl der Probanden äußerte sich zudem negativ über die durch die Software bedingte Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung. Die verlangsamte Reaktionsgeschwindigkeit erschwerte sowohl das Skizzieren als im Besonderen auch das Schreiben auf dem Graphiktablett.

Betrachtet man alle drei Versuchsgruppen im Vergleich, so zeigten sich beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ mit Ausnahme der Teiltätigkeit „Keine sichtbare Aktivität“ signifikante Unterschiede bezüglich der Anteile der Teiltätigkeiten zwischen mindestens einer der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen und den rechnergestützt Entwerfenden.
Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, lasen signifikant länger in der Problemstellung und betrachteten die selbsterstellte(n) Skizze(n) signifikant länger. Dies lässt sich durch den gegenüber den Teilnehmern, die mit AutoCAD entwarfen, hochsignifikant geringeren Skizzieranteil erklären. Das Skizzieren bzw. Zeichnen zählte neben dem Betrachten zu den Haupttätigkeiten im Entwurfsprozess. Der hochsignifikant bzw. signifikant höhere Anteil der Teiltätigkeit „Skizzieren bzw. Zeichnen“ der rechnergestützt Entwerfenden gegenüber den Personen, die den Gartengrill mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen, spricht für einen deutlich höheren Aufwand bei der Entwurfserstellung mit dem CAD-System.

Der hochsignifikante Unterschied hinsichtlich des Notierens zwischen den Versuchsgruppen (1) und (2) und den rechnergestützt entwerfenden Probanden kann durch den erforderlichen Bedienaufwand der Funktionalität des Erstellens von Text bei AutoCAD begründet werden.
Radieren bzw. Löschen war hingegen bei AutoCAD im Vergleich zu den beiden anderen Arbeitsmitteln unproblematischer möglich. Die rechnergestützte Vorgehensweise, bei der zunächst Elemente generiert wurden, die häufig danach - z. B. durch Verkürzungen - abgeändert werden mussten, bedingte einen signifikant häufigeren Einsatz dieser Teiltätigkeit.
Von den rechnergestützt Entwerfenden gestikulierten im Vergleich zu den durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden deutlich weniger Personen. Als Grund dafür kann das beim Entwerfen mit CAD in Verbindung mit der Soft- und Hardware erforderliche Vorgehen angenommen werden. Gezielte Bewegungen mit Fingern, Händen oder mit einem in der Hand gehaltenen Stift in der Luft bzw. auf dem Papier erfordern als Probehandeln die Möglichkeit einer reibungslosen, intuitiven Externalisierung. Diese war beim rechnergestützten Entwerfen aufgrund der fehlenden Einheit von Seh- und Handlungsraum, der erforderlichen sensumotorischen Übersetzung, der Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung sowie wegen der Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung nicht möglich.

Im Hinblick auf die Abfolgen der Teiltätigkeiten zeigten sich bis auf die Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ Unterschiede zwischen mindestens einer der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen und den rechnergestützt Entwerfenden. Die Teilhypothese 3.1b, die Aussagen zu den Anteilen und Abfolgen der Teiltätigkeiten machte, konnte somit nicht vollständig bestätigt werden.
Die bei den Wechseln „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ nicht nachweisbaren Unterschiede lassen sich darauf zurückführen, dass das Skizzieren bzw. Zeichnen auch beim Entwerfen mit AutoCAD die externale Hauptaktivität ausmachte.
Hinsichtlich der durchgeführten Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ ergab sich ein Unterschied zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, und den rechnergestützt Entwerfenden insoweit, dass erstere diesbezüglich signifikant häufiger wechselten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die mit Graphiktablett entwerfenden Personen sowohl einen signifikant höheren Prozentanteil bei der Teiltätigkeit „Aufgabenstudium“ als auch beim Betrachten des Entwurfs aufwiesen.
Bezogen auf die Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“ zeigten sich Unterschiede zwischen den durch Freihandskizzieren und den rechnergestützt Entwerfenden. Die ersten beiden Versuchsgruppen wechselten signifikant häufiger zwischen externen und internen Teiltätigkeiten.

Der Hauptgrund für dieses auffällige Wechselspiel war die durch das Freihandskizzieren ermöglichte Arbeitsweise: Lösungsgedanken konnten rasch externalisiert werden und das anschließende Betrachten der selbsterstellten Skizze(n) regte im Sinne eines Selbstgesprächs zu neuen Ideen an.

Hinsichtlich der Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte ergab ein Extremgruppenvergleich bei der Problemstellung „Gartengrill" folgendes Bild: Die drei Probanden der Extremgruppe mit den höchsten Lösungsgütewerten und den kürzesten Bearbeitungszeiten hatten durch Freihandskizzieren entworfen, während die Probanden der Extremgruppe mit den geringsten Lösungsgütewerten und den längsten Bearbeitungszeiten AutoCAD genutzt hatten. Dieses Ergebnis bestätigt die obengenannten Befunde zur Lösungsgüte und zur Bearbeitungszeit.
In beiden Gruppen nahm der Entwurfsschritt „Bereitstellen" mit deutlich über 30 % den größten Anteil ein. Während in der ersten Extremgruppe sehr viel generiert und geplant wurde, war dies in der zweiten Gruppe vergleichsweise selten der Fall. Hier wurde im Gegensatz dazu erheblich mehr angepasst und kontrolliert.
Die unterschiedliche Verteilung der Entwurfsschritte entsprach den Vorgehensweisen beim Entwerfen mit den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift" bzw. „Graphiktablett" und „AutoCAD". Der hohe Anteil an Generierungsschritten bei den Personen der ersten Extremgruppe wurde durch das rasche und intuitive Externalisieren beim Freihandskizzieren ermöglicht. Die Lösungserarbeitung mit dem CAD-System erforderte hingegen durch die Systemlogik ein permanentes Kontrollieren, Anpassen und auch Verwerfen des bisherigen Entwurfs.
Im Bezug auf die Abfolgen der Entwurfsschritte konnten bei dem Fallbeispiel der ersten Extremgruppe sowohl zu Beginn als auch im fortgeschrittenen Entwurfsprozess häufig Generierungs- mit vorausgehenden Planungsphasen festgestellt werden. Anpassungen und Verwerfungen fanden zu Beginn kaum und auch später nur dosiert statt.
Der als Fallbeispiel dienende, rechnergestützt entwerfende Proband der zweiten Extremgruppe tätigte in den einzelnen Fünf-Minuten-Sequenzen insgesamt weniger Schritte. Bereits nach wenigen Generierungsschritten zu Beginn der Lösungserstellung wurde nach erfolgter Handlungskontrolle mehrheitlich angepasst und verworfen. Im Laufe des Entwurfsprozesses wurde in den Denkphasen ausschließlich kontrolliert. In der Folge fanden Anpassungsschritte statt. Generiert wurde zu diesem Zeitpunkt gar nicht mehr.
Die Betrachtung der Abfolgen zeigt beim ersten Beispielfall ein Wechselspiel aus internalem und externalem Handeln. Dieses entspricht aufgrund der Merkmale der Arbeitsmittel "Papier und Bleistift" und „Graphiktablett" der charakteristischen Vorgehensweise beim Freihandskiz-

zieren. Der zweite Beispielfall weist durch die beschriebenen Schrittfolgen auf eine deutlich weniger kreative und innovative Vorgehensweise beim rechnergestützten Entwerfen hin.

Bezogen auf die Art und Weise der Lösungserzeugung unterschieden sich die Probanden der Versuchsgruppen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen, weder bei der generierenden noch bei der korrigierenden Vorgehensweise auffallend. Zwar zeigten von den Teilnehmern, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, weniger ein generierendes Vorgehen. Auch entwickelten in dieser Versuchsgruppe weniger Probanden nacheinander in korrigierender Weise Lösungsvarianten. Aufgrund ihrer Geringfügigkeit erlaubten die Unterschiede dennoch eine Bestätigung der Teilhypothese 3.2a.
Sie lassen sich zum einen durch die unterschiedliche Eingewöhnung in die Nutzung des jeweiligen Arbeitsmittels erklären. Eventuell bestanden bei Versuchsbeginn noch Unsicherheiten bei den Probanden, die den Gartengrill mit Graphiktablett entwarfen.
Zum anderen könnten problematische, softwarebedingte Aspekte des Geräts bei der Externalisierung von Bedeutung sein. In der mündlichen Nachbefragung wurden Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung und eine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung angemerkt. Diese haben möglicherweise den intuitiven Darstellungsvorgang auf dem „digitalen Papier“ behindert und dazu geführt, dass sich mehrere Entwerfende auf eine Lösungsmöglichkeit beschränkt haben.
Aufgrund der geringen Unterschiede spricht dieses Resultat dennoch für weitestgehend gleichartig ablaufende Entwurfsprozesse unter der Nutzung der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“. Durch das Freihandskizzieren mit Graphiktablett wurde das Hervorbringen von Lösungen und damit eine kreative Arbeitsweise vergleichbar unterstützt wie durch das Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift.

Im Gegensatz zu den durch Freihandskizzieren Entwerfenden hat in der Gruppe der rechnergestützt Entwerfenden keiner der Probanden eine Alternative zu der erstellten Entwurfslösung generiert. Auch nacheinander entwickelte keiner dieser Probanden durch korrigierendes Vorgehen eine weitere Lösungsmöglichkeit. Damit unterschied sich die dritte Versuchsgruppe deutlich von den beiden durch Freihandskizzieren entwerfenden Gruppen. Die Teilhypothese 3.2b konnte bestätigt werden.
Dieses Vorgehen liegt in der Art und Weise der Lösungserzeugung mit dem CAD-System begründet. Die bereits bei der Ersteingabe zumindest von Teilelementen des zu konstruierenden Objekts notwendige konkrete Datenstruktur musste vorab überlegt werden. Beim rechnergestützten Entwerfen fand häufig zunächst ein reines Abzeichnen aus dem Gedächtnis statt. Für die Externalisierung war aufgrund der notwendigen Bedienung von Maus und Tastatur, die eine

sensumotorische Übersetzung verlangten, ein großer Aufwand erforderlich. Die Bedienoperationen waren dabei mit den mentalen Problemrepräsentationen nicht kompatibel. Der nicht mögliche Wechsel des Abstraktionsgrads der Darstellung erforderte eine Übersetzung der mentalen Repräsentation in zerlegbare, geometrieorientierte Einheiten des technischen Gebildes.
Vor allem durch die fehlende Einheit von Seh- und Handlungsraum hervorgerufene Verzögerungen zwischen der Eingabe und der visuellen Rückmeldung führten zu zusätzlichen Erschwernissen der Entwurfserstellung.
In Abhängigkeit von der Komplexität des Entwurfsproblems wurde das Arbeitsgedächtnis durch diese Aspekte zusätzlich belastet. Dadurch waren für die Generierung mehrerer Varianten in den frühen Entwurfsabschnitten häufig weder mentale noch zeitliche Kapazitäten vorhanden.

Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden: Bis auf die Hypothesen 2.1b, 2.2b und 2.3b, die sich auf den Bereich des Erlebens bezogen, konnten die Annahmen hinsichtlich der drei experimentellen Bedingungen bei der Problemstellung „Gartengrill“ weitestgehend bestätigt werden. Auf die Problematik der Variablen des Erlebens wurde an entsprechender Stelle hingewiesen.
Die Hypothesen 1.1, 1.2 und 1.3 a und b, welche den Bereich der Ergebnisse betreffende Erwartungen formulierten, ließen sich vollständig bestätigen. Die Ergebnisse im Bereich des Prozesses zeigten sich mit Einschränkungen mehrheitlich hypothesenkonform.
Unter der Voraussetzung, dass sich bei der Problemstellung „Gartengrill“ weitgehend hypothesenkonforme statistische Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsgruppen zeigen lassen, war es ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit, zu überprüfen, ob sich diese Ergebnisse bei einem Entwurfsproblem mit vergleichbarem Schwierigkeitsgrad replizieren lassen oder ob sie vom Inhalt der Problemstellung abhängig sind. Dazu wurde eine Replikationsuntersuchung mit dem im Abschnitt 7.4.1.2 beschriebenen Entwurfsproblem „Korkenzieher“ entsprechend der vorgestellten Methodik durchgeführt. Im folgenden Teilkapitel 8.10 werden die Ergebnisse dieser Replikationsuntersuchung vorgestellt und anschließend interpretiert.

8.10 Ergebnisse der experimentellen Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“

8.10.1 Prüfung der Stichprobenhomogenität

8.10.1.1 Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung

Bei der Gesamtstichprobe (N = 66) konnte mit einem Mittelwert von 6,1 (SD = .72) eine hohe Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung „Korkenzieher“ ausgemacht werden.

Durch eine einfaktorielle ANOVA konnte kein signifikanter Gruppenunterschied hinsichtlich des „Commitments“ festgestellt werden (F_{ANOVA} = 1,536; p > .05). Die Motivation zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Korkenzieher“ war bei allen drei Versuchsgruppen mit durchschnittlichen Werten von 5,9 bis 6,2 hoch.

Die deskriptiven Kennwerte für die Motivation der Versuchsgruppen zur Bearbeitung der Problemstellung zeigt die Tabelle 54.

Tab. 54: Motivation der Versuchsgruppen zur Bearbeitung der Problemstellung (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Motivation** (MW $\pm$ SE) (0: überhaupt nicht motiviert – 7: sehr motiviert)
(1) Papier und Bleistift	6,2 $\pm$ .10 (SD = .48)
(2) Graphiktablett	5,9 $\pm$ .17 (SD = .81)
(3) 2D-CAD	6,1 $\pm$ .19 (SD = .89)

8.10.1.2 Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung

Für die Fähigkeit der Gesamtstichprobe (N = 66) zur räumlichen Vorstellung gelten die im Abschnitt 8.8.1.2 gemachten Aussagen.

Ein varianzanalytischer Vergleich ergab beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ bezogen auf die Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung keinen signifikanten Gruppenunterschied (F_{ANOVA} = ,904; p > .05). Die Fähigkeit aller drei Gruppen zur räumlichen Vorstellung konnte mit Mittelwerten von 1,9 bis 2,3 als jeweils durchschnittlich eingestuft werden.

Die Tabelle 55 dokumentiert die deskriptiven Kennwerte für die Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung in den einzelnen Versuchsbedingungen.

Tab. 55: Fähigkeit der Versuchsgruppen zur räumlichen Vorstellung (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung** (0: weit unterdurchschnittlich - 3: überdurchschnittlich) (MW $\pm$ SE)
(1) Papier und Bleistift	1,9 $\pm$ .24 (SD = 1.13)
(2) Graphiktablett	2,3 $\pm$ .26 (SD = 1.20)
(3) 2D-CAD	2,0 $\pm$ .25 (SD = 1.17)

8.10.2 Ergebnisse zur Fragestellung 4.1: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich der Ergebnisse

Im Hinblick auf die ergebnisbezogenen Variablen „Lösungsgüte“, „Bearbeitungszeit“ und „Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts“ zeigte eine einfaktorielle MANOVA bei der Problemstellung „Korkenzieher“, dass sich mindestens zwei der drei Versuchsgruppen hochsignifikant voneinander unterscheiden ($F_{MANOVA} = 7{,}419$; $p < .001$).

Univariate Analysen ergaben im Bezug auf die betrachteten Variablen das folgende Bild:

8.10.2.1 Lösungsgüte

Die Gesamtstichprobe (N = 66) erreichte beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ einen mittleren Wert von 60,0 % (SD = 26.63) relativ zur Ideallösung.

Eine einfaktorielle ANOVA erbrachte einen hochsignifikanten Gruppenunterschied hinsichtlich der Lösungsgüte der produzierten Entwürfe ($F_{ANOVA} = 12{,}849$; $p < .001$).

Zwischen den Versuchsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ und „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ zeigten sich diesbezüglich signifikante Unterschiede ($p_{1/2} < .05$). Die Probanden der erstgenannten Bedingung erzielten für die Güte der konstruktiven Lösung durchschnittlich einen Wert von 76,4 %. Der Mittelwert der Versuchsgruppe, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf, war mit 61,9 % signifikant geringer.

Zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Teilnehmern und den rechnergestützt Entwerfenden erbrachten Einzelvergleiche hochsignifikante bzw. signifikante Unterschiede ($p_{1/3} < .01$ bzw. $p_{2/3} < .05$): Deren Lösungsgüte wurde durchschnittlich mit 41,7 % relativ zur Ideallösung eingestuft.

Die deskriptiven Kennwerte für die Lösungsgüte der drei Versuchsgruppen sind in der Tabelle 56 zusammengefasst.

Tab. 56: Lösungsgüte der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Lösungsgüte** (in %) (MW $\pm$ SE der relativen Häufigkeiten)
(1) Papier und Bleistift	76,4 (0,764) $\pm$ 2.17 (SD = 10.16)
(2) Graphiktablett	61,9 (0,619) $\pm$ 4.84 (SD = 22.69)
(3) 2D-CAD	41,7 (0,417) $\pm$ 6.54 (SD = 30.69)

8.10.2.2 Bearbeitungszeit

Die Bearbeitungsdauer der Gesamtstichprobe (N = 66) betrug beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ durchschnittlich 65,8 Minuten (SD = 18.68).

Mittels einer einfaktoriellen ANOVA konnte ein hochsignifikanter Gruppenunterschied bezüglich der Bearbeitungszeit festgestellt werden (F_{ANOVA} = 19,729; $p < .001$)

Zwischen den Versuchsgruppen (1) und (2) zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Bearbeitungszeit ($p_{1/2} > .05$): Die Probanden benötigten durchschnittlich 58,9 bzw. 56,9 Minuten bis zur Fertigstellung der Lösung.

Im Gegensatz dazu betrug die Bearbeitungsdauer der rechnergestützt Entwerfenden bei der Problemstellung „Korkenzieher“ im Mittel 82,9 Minuten. Diese unterschieden sich damit in Einzelvergleichen hochsignifikant von den Probanden der experimentellen Bedingungen (1) und (2) ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} < .01$).

Die Tabelle 57 dokumentiert die deskriptiven Kennwerte für die Bearbeitungszeit der drei Versuchsgruppen.

Tab. 57: Bearbeitungszeit der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Bearbeitungszeit** (in Min.) (MW $\pm$ SE)
(1) Papier und Bleistift	58,9 $\pm$ 3.21 (SD = 14.71)
(2) Graphiktablett	56,9 $\pm$ 2.35 (SD = 11.04)
(3) 2D-CAD	82,9 $\pm$ 4.03 (SD = 18.01)

8.10.2.3 Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts

Die Gesamtstichprobe (N = 66) erzielte bei der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Entwürfe für die Empfängergruppe „Technischer Laie“ einen Durchschnitts-

wert von 4,0 (SD = 2.98) und für die Empfängergruppe „Experte“ einen Wert von 4,2 (SD = 2.56) bei 8 maximal möglichen Punkten.

Eine einfaktorielle ANOVA ergab sowohl im Hinblick auf die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts an technische Laien als auch an Experten hochsignifikante Gruppenunterschiede (F_{ANOVA} = 14,688/13,678; $p < .001$).

Ein Einzelvergleich der Teilnehmer der ersten beiden experimentellen Bedingungen ergab beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ für beide Empfängergruppen signifikante Unterschiede (jeweils $p_{1/2} < .05$): Die Lösungen der Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, wurden mit durchschnittlichen Werten von 6,1 und 6,0 als signifikant besser kommunizierbar eingestuft als die derjenigen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen. Deren Entwürfe erzielten sowohl im Hinblick auf die Kooperation mit Laien als auch mit Experten im Mittel einen Wert von 4,0.

Die Probanden der ersten beiden Bedingungen unterschieden sich bei der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Entwürfe im Hinblick auf beide Empfängergruppen hochsignifikant bzw. signifikant von den rechnergestützt Entwerfenden (jeweils $p_{1/3} < .01$ und $p_{2/3} < .05$). Deren durchschnittliche Werte betrugen für die Kooperation mit technischen Laien 2,0 und mit Experten 2,6 und lagen damit deutlich unter denen der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen.

Die Tabelle 58 gibt einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts in den einzelnen experimentellen Bedingungen getrennt nach Empfängergruppen.

Tab. 58: Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts** (max. Punktzahl: 8) (MW $\pm$ SE)
(1) Papier und Bleistift	Laien: 6,1 $\pm$ .49 (SD = 2.30) Experten: 6,0 $\pm$ .39 (SD = 1.81)
(2) Graphiktablett	Laien: 4,0 $\pm$ .64 (SD = 3.00) Experten: 4,0 $\pm$ .52 (SD = 2.42)
(3) 2D-CAD	Laien: 2,0 $\pm$ .45 (SD = 2.13) Experten: 2,6 $\pm$ .48 (SD = 2.24)

8.10.3 Ergebnisse zur Fragestellung 4.2: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Erlebens

Eine einfaktorielle MANOVA erbrachte beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ bezüglich der Variablen des Erlebens „Erlebte Problemschwierigkeit“, „Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit“ und „Psychische Beanspruchung“ keine signifikanten Unterschiede zwischen den experimentellen Bedingungen ($F_{MANOVA} = 1{,}218$; $p > .05$).

Im Hinblick auf die betrachteten Variablen zeigten sich in univariaten Analysen die im folgenden dargestellten Ergebnisse:

8.10.3.1 Erlebte Problemschwierigkeit

Die Gesamtstichprobe (N = 66) stufte das Entwurfsproblem „Korkenzieher“ im Mittel mit einem Wert von 3,2 (SD = 1.77) als durchschnittlich schwierig ein.

Eine univariate Testung erbrachte keinen signifikanten Gruppenunterschied ($F_{ANOVA} = 1{,}462$; $p > .05$).

Die deskriptiven Kennwerte für die erlebte Problemschwierigkeit der drei Versuchsgruppen sind in der Tabelle 59 dokumentiert.

Tab. 59: Erlebte Problemschwierigkeit der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Erlebte Problemschwierigkeit** (MW $\pm$ SE) (0: sehr schwierig – 7: überhaupt nicht schwierig)
(1) Papier und Bleistift	3,6 $\pm$ .43 (SD = 2.00)
(2) Graphiktablett	3,3 $\pm$ .28 (SD = 1.33)
(3) 2D-CAD	2,7 $\pm$ .40 (SD = 1.87)

8.10.3.2 Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit

Die Probanden der Gesamtstichprobe (N = 66) waren sich hinsichtlich der technischen Richtigkeit der von ihnen produzierten Entwurfslösungen bei der Problemstellung „Korkenzieher“ eher sicher: Sie gaben ihre Sicherheit mit einem durchschnittlichen Wert von 4,8 (SD = 1.66) an.

Durch eine einfaktorielle ANOVA konnte im Bezug auf die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit ein signifikanter Gruppenunterschied festgestellt werden ($F_{ANOVA} = 3{,}988$; $p < .05$).

Die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, schätzten ihre Sicherheit im Mittel mit einem Wert von 5,5 ein; die Teilnehmer der zweiten Versuchsbedin-

gung waren sich mit einem Durchschnittswert von 4,9 etwas weniger sicher. Dieser Unterschied erwies sich jedoch in einem Einzelvergleich als nicht signifikant ($p_{1/2} > .05$).

Zwischen der Versuchsgruppe (1) und den rechnergestützt entwerfenden Probanden zeigte sich ein signifikanter Unterschied wie folgt: Die Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, waren sich im Durchschnitt signifikant sicherer im Bezug auf die technische Richtigkeit ihrer Lösungen als die Probanden, die den Korkenzieher rechnergestützt entwarfen ($p_{1/3} < .05$). Diese schätzten ihre Sicherheit im Mittel mit einem Wert von 4,1 ein.

Die Personen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, unterschieden sich in einem Einzelvergleich hingegen nicht bedeutsam von der dritten Versuchsgruppe ($p_{2/3} > .05$).

Die Tabelle 60 fasst die deskriptiven Kennwerte für die Sicherheit der drei Versuchsgruppen hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit überblicksartig zusammen.

Tab. 60: Sicherheit der Versuchsgruppen hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher")

Experimentelle Bedingung	**Sicherheit** (MW $\pm$ SE) (0: überhaupt nicht sicher – 7: vollkommen sicher)
(1) Papier und Bleistift	5,5 $\pm$ .27 (SD = 1.28)
(2) Graphiktablett	4,9 $\pm$ .29 (SD = 1.34)
(3) 2D-CAD	4,1 $\pm$ .43 (SD = 2.04)

8.10.3.3 Psychische Beanspruchung

Hinsichtlich der erlebten Veränderungen in den beanspruchungsrelevanten Faktoren wies die Gesamtstichprobe (N = 66) bei der Problemstellung „Korkenzieher" durchschnittlich folgende Differenzen aus Prä- und Posttestwerten auf: 0,37 (SD = 1.19) für den Faktor „Psychophysischer Zustand", 0,58 (SD = 1.2) für die Konzentration, 0,7 (SD = .97) für die Motivation und 0,36 (SD = 1.1) für die affektive Lage.

Eine univariate Testung ergab diesbezüglich keine signifikanten Gruppenunterschiede (F_{ANOVA} = ,455/,560/,806/,131; p > .05).

Die Tabelle 61 gibt einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte für die psychische Beanspruchung der drei Versuchsgruppen, aufgegliedert in die vier Faktoren.

Tab. 61: Psychische Beanspruchung der Versuchsgruppen: Differenz aus Prä- und Posttestwert (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Psychische Beanspruchung** (MW ± SE) (Differenz aus Prä- und Posttestwert)
(1) Papier und Bleistift	Psychophysischer Zustand: 0,44 ± .32 (SD = 1.48)
	Konzentration: 0,37 ± .33 (SD = 1.56)
	Motivation: 0,50 ± .20 (SD = .92)
	Affektive Lage: 0,28 ± .26 (SD = 1.22)
(2) Graphiktablett	Psychophysischer Zustand: 0,49 ± .23 (SD = 1.08)
	Konzentration: 0,62 ± .22 (SD = 1.01)
	Motivation: 0,87 ± .22 (SD = 1.02)
	Affektive Lage: 0,36 ± .20 (SD = .94)
(3) 2D-CAD	Psychophysischer Zustand: 0,17 ± .21 (SD = .99)
	Konzentration: 0,75 ± .21 (SD = .96)
	Motivation: 0,74 ± .21 (SD = .99)
	Affektive Lage: 0,45 ± .25 (SD = 1.17)

Auch bei der Problemstellung „Korkenzieher“ wurden in der mündlichen Nachbefragung von einem Großteil der Nutzer des Graphiktabletts Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung gegenüber Papier und eine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung berichtet (vgl. Abschnitt 8.8.3.3).

8.10.4 Ergebnisse zur Fragestellung 4.3: Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen im Bereich des Prozesses

Hinsichtlich der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten“ ergab eine einfaktorielle MANOVA bei der Problemstellung „Korkenzieher“ mindestens zwischen zwei der drei Versuchsgruppen hochsignifikante Unterschiede ($F_{MANOVA} = 4{,}282$; $p < .001$).

Die Ergebnisse der univariaten Analysen im Bezug auf die betrachteten Variablen sind im folgenden dargestellt.

Eine Darstellung der Ergebnisse zu den Variablen „Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte“ sowie „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen“ findet sich deskriptiv in den Abschnitten 8.10.4.2 und 8.10.4.3.

8.10.4.1 Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten

Bei der Gesamtstichprobe (N = 66) ergaben sich anteilig an der Bearbeitungszeit durchschnittlich die in der Tabelle 62 dargestellten Prozentwerte für die einzelnen, während der Lösungserarbeitung des Korkenziehers ausgeführten Teiltätigkeiten.

Tab. 62: Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Gesamtstichprobe an der Bearbeitungszeit (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher")

Teiltätigkeit	**Anteil an der Bearbeitungszeit** (in %) (MW $\pm$ SE der relativen Häufigkeiten)
Aufgabenstudium	4,8 (0,048) $\pm$ .31 (SD = 2.46)
Skizzieren bzw. Zeichnen	36,8 (0,368) $\pm$ 1.42 (SD = 11.30)
Notieren	6,3 (0,063) $\pm$ .88 (SD = 7.02)
Betrachten	42,7 (0,427) $\pm$ 1.19 (SD = 9.47)
Radieren bzw. Löschen	3,2 (0,032) $\pm$ .30 (SD = 2.40)
Keine sichtbare Aktivität	3,2 (0,032) $\pm$ .83 (SD = 2.40)

Eine einfaktorielle ANOVA ergab hochsignifikante bzw. signifikante Gruppenunterschiede hinsichtlich der prozentualen Anteile folgender Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit: „Skizzieren bzw. Zeichnen" (F_{ANOVA} = 25,468; $p < .001$), „Notieren" (F_{ANOVA} = 14,855; $p < .001$), „Radieren bzw. Löschen" (F_{ANOVA} = 5,160; $p < .01$) und „Keine sichtbare Aktivität" (F_{ANOVA} = 3,953; $p < .05$). Hinsichtlich der Teiltätigkeiten „Aufgabenstudium" (F_{ANOVA} = 1,181; $p > .05$) und „Betrachten" (F_{ANOVA} = 1,326; $p > .05$) zeigten sich keine signifikanten Gruppenunterschiede.

Zwischen den Versuchsgruppen (1) und (2) konnten beim Entwurfsproblem „Korkenzieher" mittels Einzelvergleichen keine bedeutsamen Unterschiede bezüglich der prozentualen Anteile der Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit festgestellt werden (jeweils $p_{1/2} > .05$).

Zwischen den beiden durch Freihandskizzieren entwerfenden Gruppen und den rechnergestützt entwerfenden Probanden erbrachten Einzelvergleiche folgende Ergebnisse: Beim Aufgabenstudium in Form des Lesens unterschieden sich die Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen, und die mit AutoCAD Entwerfenden nicht signifikant voneinander ($p_{1/3}$ und $p_{2/3} > .05$). Die durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen lasen mit Anteilen von 4,3 und 5,4 % ähnlich lange in der Problemstellung wie die Versuchsgruppe (3) mit 4,8 %.

Bezüglich der Teiltätigkeit „Skizzieren bzw. Zeichnen" zeigten sich hochsignifikante Unterschiede zwischen den durch Freihandskizzieren und den rechnergestützt entwerfenden Proban-

den ($p_{1/3}$ und $p_{2/3}$ < .01). Den geringsten Skizzieranteil mit 29,7 % wiesen die Probanden der Untersuchungsbedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ auf, gefolgt von den Probanden der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ mit 33,9 %. Die rechnergestützt Entwerfenden zeichneten mit einem Anteil von durchschnittlich 47,6 % hochsignifikant länger als die beiden ersten Versuchsgruppen.

Beide durch Freihandskizzieren entwerfenden Gruppen wichen in ihrem Prozentanteil für die Teiltätigkeit „Notieren“ hochsignifikant von den rechnergestützt entwerfenden Teilnehmern ab ($p_{1/3}$ und $p_{2/3}$ < .01). Die Versuchspersonen der Bedingungen (1) und (2) schrieben durchschnittlich 8,8 % bzw. 9,3 % der Bearbeitungszeit, wohingegen das Notieren von Text bei der dritten Versuchsgruppe im Mittel nur 0,5 % der Zeit in Anspruch nahm.

Im Hinblick auf das Betrachten der Skizze(n) bzw. Zeichnung(en) ließen sich zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen und den mit AutoCAD entwerfenden Probanden in einem Einzelvergleich keine signifikanten Unterschiede feststellen ($p_{1/3}$ und $p_{2/3}$ > .05). Die Probanden der drei experimentellen Bedingungen nutzten im Mittel 43,6 %, 44,9 % und 39,9 % ihrer Bearbeitungszeit zum Betrachten des erstellten Entwurfs.

Bezogen auf die Teiltätigkeit „Radieren bzw. Löschen“ unterschieden sich die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, hochsignifikant von den rechnergestützt Entwerfenden ($p_{1/3}$ < .01). Die erste Versuchsgruppe löschte mit einem durchschnittlichen Prozentanteil von 2,1 % deutlich weniger als die dritte Versuchsgruppe mit 4,4 %. Zwischen den Teilnehmern, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, und der dritten Versuchsgruppe zeigte sich kein signifikanter Unterschied ($p_{2/3}$ > .05).

Hinsichtlich der Teiltätigkeit „Keine sichtbare Aktivität“ erbrachte ein Einzelvergleich signifikante Unterschiede zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen und den Probanden, die rechnergestützt entwarfen ($p_{1/3}$ und $p_{2/3}$ < .05). Die entsprechenden Anteile an der Bearbeitungszeit betrugen im Mittel 7,3 % bzw. 7,9 % vs. 2,8 %.

Die deskriptiven Kennwerte in den einzelnen experimentellen Bedingungen für die Anteile der Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit fasst die Tabellen 63 überblicksartig zusammen.

Tab. 63: Prozentuale Anteile der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen an der Bearbeitungszeit (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Anteile der Teiltätigkeiten** (in %) (MW ± SE der relativen Häufigkeiten)
(1) Papier und Bleistift	Aufgabenstudium: 4,3 (0,043) ± .36 (SD = 1.63)
	Skizzieren bzw. Zeichnen: 33,9 (0,339) ± 1.68 (SD = 7.69)
	Notieren: 8,8 (0,088) ± 1.73 (SD = 7.95)
	Betrachten: 43,6 (0,436) ± 2.64 (SD = 12.11)
	Radieren bzw. Löschen: 2,1 (0,021) ± .39 (SD = 1.77)
	Keine sichtbare Aktivität: 7,3 (0,073) ± 1.32 (SD = 6.03)
(2) Graphiktablett	Aufgabenstudium: 5,4 (0,054) ± .70 (SD = 3.26)
	Skizzieren bzw. Zeichnen: 29,7 (0,297) ± 1.72 (SD = 8.08)
	Notieren: 9,3 (0,093) ± 1.29 (SD = 6.05)
	Betrachten: 44,4 (0,444) ± 1.17 (SD = 5.48)
	Radieren bzw. Löschen: 3,2 (0,032) ± .49 (SD = 2.29)
	Keine sichtbare Aktivität: 7,9 (0,079) ± 1.77 (SD = 8.30)
(3) 2D-CAD	Aufgabenstudium: 4,8 (0,048) ± .47 (SD = 2.11)
	Skizzieren bzw. Zeichnen: 47,6 (0,476) ± 2.13 (SD = 9.52)
	Notieren: 0,5 (0,005) ± .18 (SD = .80)
	Betrachten: 39,9 (0,399) ± 2.15 (SD = 9.62)
	Radieren bzw. Löschen: 4,4 (0,044) ± .59 (SD = 2.63)
	Keine sichtbare Aktivität: 2,8 (0,028) ± .74 (SD = 3.31)

Betrachtet man die Gesamtstichprobe (N = 66), so gestikulierten 47 Probanden (71,2 %) bei der Bearbeitung der Problemstellung „Korkenzieher“; 29 (43,9 %) äußerten sich verbal.

Ein deskriptiver Vergleich der Versuchsgruppen (1) und (2) erbrachte im Hinblick auf die Teiltätigkeiten „Gestikulieren“ und „Sprechen“ folgende Ergebnisse (s. Tabelle 64): Von den durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwerfenden Probanden gestikulierten mit 95,5 % (21Vpn) deutlich mehr als von den durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett Entwerfenden. Hier machten nur 17 Versuchspersonen (77,5 %) während der Lösungserarbeitung gezielte Bewegungen mit Fingern, Händen oder mit einem in der Hand gehaltenen Stift in der Luft bzw. auf dem Papier.

Es äußerten sich 11 (50,0 %) bzw. sechs (27,3 %) Probanden verbal.

Zwischen den Versuchsgruppen, die durch Freihandskizzieren entwarfen, und den rechnergestützt Entwerfenden ergaben sich bezüglich der Teiltätigkeit „Gestikulieren“ auffällige Unterschiede: Bei der dritten experimentellen Bedingung gestikulierten mit neun Probanden (40,9 %) deutlich weniger als bei den beiden ersten experimentellen Bedingungen.

Von den Probanden der dritten Bedingung sprachen 12 (54,4 %) im Laufe des Entwurfsprozesses.

Tab. 64: Anteile der während der Lösungserarbeitung gestikulierenden und sprechenden Probanden pro Versuchsgruppe (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Gestikulierende Probanden** (in %)	**Sprechende Probanden** (in %)
(1) Papier und Bleistift	95,5	50,0
(2) Graphiktablett	77,5	27,3
(3) 2D-CAD	40,9	54,4

Bezogen auf die Abfolgen der Teiltätigkeiten vollzog die Gesamtstichprobe (N = 66) bei der Problemstellung „Korkenzieher“ pro Stunde durchschnittlich 6,6 Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ (SD = 10.66), 2,1 Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ (SD = 1.65) und 164,7 Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“ (SD = 99.68).
Eine einfaktorielle ANOVA erbrachte signifikante bzw. hochsignifikante Gruppenunterschiede bei den Wechseln „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ (F_{ANOVA} = 3,486; $p < .05$) und „Externe – interne Teiltätigkeit“ (F_{ANOVA} = 8,174; $p = .001$). Im Hinblick auf die Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ zeigten sich hier kein signifikanter Gruppenunterschied zwischen den experimentellen Bedingungen (F_{ANOVA} = ,562; $p > .05$)
Zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen, ergaben Einzelvergleiche keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Abfolgen der Teiltätigkeiten in Form der Wechsel „Aufgabenstudium – externe bzw. interne Teiltätigkeit“ (jeweils $p_{1/2} > .05$). Die Teilnehmer der ersten Versuchsbedingung wechselten pro Stunde im Mittel 5,7 mal vom Aufgabenstudium zu externen und 2,8 mal zu internen Teiltätigkeiten. Bei der zweiten Versuchsgruppe betrug die entsprechende Anzahl an Wechseln 5,5 und 2,1.
Bezüglich der Anzahl der Wechsel zwischen externen und internen Teiltätigkeiten erbrachte ein Einzelvergleich beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ einen signifikanten Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen ($p_{1/2} < .05$): Mit 224,2 Wechseln pro Stunde wechselten die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, während der Erarbeitung der konstruktiven Lösung signifikant häufiger zwischen externen und internen Teiltätigkeiten als die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett Entwerfenden mit 155,8 Wechseln.
Bei einem Einzelvergleich ließ sich kein bedeutsamer Unterschied zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen und den rechnergestützt entwerfenden Proban-

den hinsichtlich der Wechsel „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit feststellen ($p_{1/3}$ und $p_{2/3}$ > .05).

Es zeigten sich jedoch signifikante bzw. hochsignifikante Unterschiede zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und den rechnergestützt entwerfenden Teilnehmern hinsichtlich der durchschnittlichen Anzahl der Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ ($p_{1/3}$ < .05) sowie „Externe – interne Teiltätigkeit“ ($p_{1/3}$ < .01): Die Probanden der Versuchsgruppe (1) wechselten im Mittel 2,8 mal pro Stunde zwischen dem Lesen und internen Teiltätigkeiten, wohingegen hier bei den mit AutoCAD Entwerfenden nur 1,5 Wechsel zu verzeichnen waren. Die Anzahl der Wechsel „Externe - interne Teiltätigkeit“ betrug bei den durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwerfenden Teilnehmern 224,2 Wechsel im Vergleich zu 111,9 bei den Versuchspersonen, die den Korkenzieher rechnergestützt entwarfen.

Die Gruppe derjenigen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, unterschied sich in beiden Fällen nicht signifikant von der dritten Versuchsgruppe (jeweils $p_{2/3}$ > .05).

In der Tabelle 65 sind die deskriptiven Kennwerte für die Abfolgen der Teiltätigkeiten der drei Versuchsgruppen in Form der verschiedenen Wechsel dokumentiert.

Tab. 65: Abfolgen der Teiltätigkeiten der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	**Abfolgen der Teiltätigkeiten** (Anzahl der Wechsel pro Stunde) (MW $\pm$ SE)
(1) Papier und Bleistift	Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit: 5,8 $\pm$ 1.66 (SD = 7,60) Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit: 2,8 $\pm$ .40 (SD = 1.83) Externe – interne Teiltätigkeit: 224,2 $\pm$ 24.9 (SD = 114.17)
(2) Graphiktablett	Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit: 5,5 $\pm$ 1.62 (SD = 7.61) Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit: 2,1 $\pm$ .34 (SD = 1.59) Externe – interne Teiltätigkeit: 155,8 $\pm$ 12.67 (SD = 59.40)
(3) 2D-CAD	Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit: 8,7 $\pm$ 3.46 (SD = 15.46) Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit: 1,5 $\pm$ .28 (SD = 1.27) Externe – interne Teiltätigkeit: 111,9 $\pm$ 19.82 (SD = 88.65)

8.10.4.2 Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte

Die drei Probanden 47, 54 und 55 der Extremgruppe mit den höchsten Werten für die Lösungsgüte und den kürzesten Bearbeitungszeiten hatten den Korkenzieher durch Freihandskizzieren

mit Papier und Bleistift entworfen. Sie führten im Mittel 335 Schritte während der Erarbeitung des Entwurfs aus; das sind durchschnittlich 8,8 Schritte pro Minute.

Die drei Versuchspersonen 10, 39 und 42 mit den geringsten Werten für die Lösungsgüte und den längsten Bearbeitungszeiten hatten dagegen alle rechnergestützt entworfen. Ihre Gesamtschrittanzahl betrug im Mittel 871 Schritte; das entspricht durchschnittlich 8,3 Schritten pro Minute.

Die Tabelle 66 gibt einen Überblick über die Probanden des Extremgruppenvergleichs sowie deren Lösungsgüte, Bearbeitungszeit und Gesamtschrittanzahl.

Tab. 66: Extremgruppenvergleich: Lösungsgütewert, Bearbeitungszeit und Gesamtschrittanzahl der Probanden (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher")

	Höchste Lösungsgütewerte und kürzeste Bearbeitungszeiten			**Geringste Lösungsgütewerte und längste Bearbeitungszeiten**		
	Vp 47 Papier und Bleistift	Vp 54 Papier und Bleistift	Vp 55 Papier und Bleistift	Vp 10 CAD	Vp 39 CAD	Vp 42 CAD
Lösungsgüte (in %)	83,1	97,3	87,6	52,4	0	0
Bearbeitungszeit (in Min.)	34	47	34	106	104	104
Gesamtschrittanzahl (absolute Häufigkeiten)	320	390	296	924	869	820
Gesamtschrittanzahl (relative Häufigkeiten: Schritte pro Min.)	9,4	8,3	8,7	8,7	8,4	7,9

Die erste Extremgruppe stimmte in den prozentualen Anteilen für die einzelnen Entwurfsschritte weitestgehend überein (s. Tabelle 67). Am häufigsten wurden mit mittleren Anteilen von 27,8 und 21,8 % Generierungs- und Bereitstellungsschritte getätigt, gefolgt von Anpassungs- (21,9 %) und Planungsschritten (13,6 %). Seltener kontrollierten (7,7 %) und wiederholten (4,7 %) diese Teilnehmer während des Prozesses der Lösungserarbeitung. Am geringsten war der Anteil der Verwerfungsschritte mit durchschnittlich 2,4 %.

Auch bei der zweiten Extremgruppe gab es keine auffallenden Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden. Am häufigsten erfolgten Bereitstellungsschritte mit durchschnittlich 43,5 %, d. h., die Personen mit den geringsten Werten für die Lösungsgüte und den längsten Bearbeitungszeiten stellten im Vergleich zur ersten Extremgruppe deutlich häufiger bereit. Anpassungsschritte wurden mit einem durchschnittlichen Anteil von 19,5 % vergleichbar häufig ausgeführt. Es wurde jedoch mit 14,9 und 6,9 % im Mittel erheblich mehr kontrolliert und verwor-

fen. Generierungs- und Planungsschritte wurden mit durchschnittlichen Prozentanteilen von 5,2 und 4,3 % bemerkenswert selten ausgeführt.

Tab. 67: Extremgruppenvergleich: Prozentuale Anteile der Entwurfsschritte an der Gesamtschrittanzahl (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

	Höchste Lösungsgütewerte und kürzeste Bearbeitungszeiten			**Geringste Lösungsgütewerte und längste Bearbeitungszeiten**		
	Vp 47 Papier und Bleistift	Vp 54 Papier und Bleistift	Vp 55 Papier und Bleistift	Vp 10 CAD	Vp 39 CAD	Vp 42 CAD
Planung (P)	13,1	12,6	15,2	2,1	4,8	5,9
Bereitstellung (B)	24,4	18,8	22,3	45,6	41,7	43,2
Generierung (G)	30,0	23,3	30,1	3,9	3,7	8,1
Kontrolle (K)	5,9	11,2	6,1	12,9	18,9	12,8
Verwerfung (V)	3,4	3,1	0,7	5,2	7,2	8,2
Anpassung (A)	13,8	27,7	24,3	26,6	17,8	14,1
Wiederholung (W)	9,4	3,3	1,4	3,8	5,9	7,8

Im weiteren sollen die Abfolgen der Entwurfsschritte der Probanden 55 und 10 näher betrachtet werden. Die Abbildung 11 zeigt die erste Sequenz der Lösungserarbeitung des Probanden 55, der den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarf und einen sehr hohen Wert für die Lösungsgüte in einer kurzen Bearbeitungszeit erreichte.

1. Sequenz: **Minute 1 bis 5**

P / B / G / P / B / **G** / P / B / **G** / P / **G** / B/ **G** / **A** / **G** / **A** / **G** / **P** / **G** / **P** / B / **G** / **A** / **G** / **A** / **P** / **G** / **A** / **G** / **P** / B / **G** / B / **G** / B / **G** / **A** / **G** / B / W / B / P / **G** / **A** / **P** / **G** / **A** / K / W / **P** / **G** / **A** / **G** / **A** / K / B / W / **P** / **G** / **A** //

Abb. 11: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 55: 1. Sequenz (Minute 1 bis 5) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Es finden sich regelmäßige Wechsel zwischen internalen Planungs- und externalen Generierungsschritten, denen meist Bereitstellungen zwischengelagert sind. Nach anfänglichem Generieren werden auch Anpassungen durchgeführt.

In der Abbildung 12 ist der Ablauf der ersten beiden Zeiteinheiten der Versuchsperson 10 dargestellt. Diese erarbeitete die Lösung rechnergestützt und erzielte bei langer Bearbeitungsdauer einen sehr geringen Wert für die Lösungsgüte.

1. Sequenz: Minute 1 bis 5

P / B / B / **G** / B / **G** / B / **G** / B / **A** / B / **A** / B / **A** / K / B / **A** / B / **P** / B / **G** / B / **A** / **P** / B / **G** / K / B / **G** / **A** / B / **A** / K / B / **A** / B / **G** / B / **A** / **P** / B / **G** / B / **A** / B / **A** / **P** / **G** / B / **A** / B / **V** / B //

2. Sequenz: Minute 6 bis 10

V / B / K / **V** / B / **V** / W / B / **A** / B / **A** / K / B / **V** / K / W / K / B / **A** / K / B / **A** / B / **A** / B / **A** / B / **A** / B / **A** / K / B / **A** / B / **G** / B / **A** / B / **V** / B / W / B / **A** / B / B / K / B / **A** / B //

Abb. 12: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 10: 1. und 2. Sequenz (Minute 1 bis 10) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Im Vergleich zur Person 55 ist die Häufigkeit an Generierungs- und Planungsschritten hier deutlich geringer. In der zweiten Sequenz wird nur ein einziges Mal generiert, dafür finden vergleichsweise viele Anpassungen und Verwerfungen statt.

In einem fortgeschrittenen Stadium der Lösungsfindung zeigen sich bei der durch Freihandskizzieren entwerfenden Person 55 nach wie vor zahlreiche Generierungen mit vorausgehenden Planungsphasen (s. Abbildung 13). Auch angepasst wird häufig.

4. Sequenz: Minute 16 bis 20

P / B / **G** / **A** / **G** / **P** / **G** / **A** / B / **G** / B / **G** / K / B / **P** / B / **G** / B / **P** / **G** / **A** / **P** / B / V / K / **A** / K / **A** / **G** / **A** / B / **P** / **G** / **A** / **P** / B / **G** / **A** / B / **P** / **G** / **P** / **G** / K / **A** / B //

Abb. 13: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 55: 4. Sequenz (Minute 16 bis 20) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Die Person 10 generiert dagegen selten und führt in den externalisierenden Abschnitten größtenteils Anpassungsschritte aus, die die Folge einer Handlungskontrolle darstellen (s. Abbildung 14).

13. Sequenz: Minute 61 bis 65

K / B / **A** / B / **A** / **A** / B / **A** / B / W / B / **A** / **K** / B / **A** / **K** / B / W / **K** / B / V / **K** / B / V / B / W / B / **K** / B / **K** / B / **A** / B / **A** / B / **A** / **K** / B / **A** / **K** / B / **A** / **K** / B / W / **K** / B / **A** / B / W / B / W / **K** / B / **A** / B / **K** / B //

Abb. 14: Extremgruppenvergleich: Ausschnitt aus dem Protokoll der Entwurfsschritte der Vp 10: 13. Sequenz (Minute 61 bis 65) (N = 6; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

8.10.4.3 Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen

Beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ generierten 23 Probanden (34,8 %) der Gesamtstichprobe (N = 66) zu Beginn Alternativen, davon 15 (22,7 %) beim Hauptprinzip und jeweils vier (6,1 %) bei Teilprinzipien bzw. sowohl beim Hauptprinzip als auch bei Teilprinzipien. Bezogen auf die Gesamtstichprobe betrug die Anzahl der generierten Lösungen durchschnittlich ≈ 2; die Teilgruppe der generierend vorgehenden Probanden entwickelte zu Beginn im Mittel 3,0 Lösungsvarianten.

Von den 22 Probanden, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, fielen 16 (72,7 %) durch eine generierende Vorgehensweise auf: Zehn (45,5 %) erstellten zu Beginn mindestens zwei Varianten beim Hauptprinzip, jeweils drei (13,6 %) bei Teilprinzipien bzw. sowohl beim Hauptprinzip als auch bei Teilprinzipien. Die gesamte Versuchsgruppe (1) zog - ebenso wie die davon generierend vorgehenden Probanden - zu Beginn im Mittel ≈ 3 Lösungsmöglichkeiten in Betracht, bevor die Entscheidung für eine Variante fiel.

Im Vergleich dazu wiesen von den 22 Versuchspersonen der zweiten experimentellen Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ nur sieben (31,8 %) ein generierendes Vorgehen auf: Fünf (22,7 %) zogen beim Hauptprinzip mindestens zwei Lösungen gleichzeitig in Betracht, jeweils ein Proband (4,5 %) bei Teilprinzipien bzw. sowohl beim Hauptprinzip als auch bei Teilprinzipien. Bezogen auf die gesamte Versuchsgruppe (2) wurden im Schnitt ≈ 2 Lösungsmöglichkeiten entwickelt; in der Teilgruppe der generierend vorgehenden Teilnehmer waren es ≈ 3.

Die Probanden, die den Korkenzieher mit AutoCAD entwarfen, gingen im Gegensatz zu den durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchspersonen ausschließlich korrigierend vor. Keiner der rechnergestützt entwerfenden Probanden generierte zu Beginn mehr als eine Lösungsmöglichkeit. Damit unterschied sich die dritte Gruppe bezüglich der Häufigkeit des generierenden Vorgehens und der Anzahl der hier generierten Alternativen deutlich von den ersten

beiden Versuchsgruppen, vor allem von den Teilnehmern, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen.

Einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte für das generierende Vorgehen der drei Versuchsgruppen bei der Lösungserzeugung gibt die Tabelle 68.

Tab. 68: Lösungserzeugung: generierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher")

Experimentelle Bedingung	Generierendes Vorgehen (in %)	Gesamtanzahl der zu Beginn entwickelten Varianten (MW $\pm$ SE)	Zu Beginn entwickelte Varianten der generierend Vorgehenden (MW)
(1) Papier und Bleistift	72,7	2,5 $\pm$ .39 (SD = 1.85)	3,1
(2) Graphiktablett	31,8	1,6 $\pm$ .24 (SD = 1.14)	2,7
(3) 2D-CAD	0	1,0 $\pm$ .00 (SD = 0)	-

Betrachtet man die Gesamtstichprobe (N = 66), so gingen bei der Lösungserzeugung des Korkenziehers 43 Probanden (65,2 %) ausschließlich korrigierend vor. Sechs davon betrachteten durch eine korrigierende Vorgehensweise nacheinander mehrere Lösungsvarianten: Zwei Teilnehmer erstellten nacheinander vier, vier Teilnehmer zwei Lösungen.

In der ersten Versuchsgruppe zeigten sechs (27,3 %) Teilnehmer ein ausschließlich korrigierendes Vorgehen; in der zweiten Gruppe waren dies 15 (68,2 %).

Von den oben erwähnten sechs Probanden, die nacheinander durch korrigierendes Vorgehen Lösungsvarianten entwickelten, gehörte einer (4,5 %) der Versuchsgruppe (1) an; dieser erstellte vier Varianten. Die fünf restlichen Versuchspersonen (22,7 %) waren der zweiten Bedingung zugeordnet; vier von ihnen betrachteten nacheinander zwei, einer vier Varianten.

Die Probanden, die mit AutoCAD entwarfen, gingen allesamt korrigierend vor und erstellten auch nacheinander in korrigierender Weise keine Lösungsvarianten.

Die Tabelle 69 fasst die deskriptiven Kennwerte für das korrigierende Vorgehen der drei Versuchsgruppen bei der Lösungserzeugung zusammen.

Tab. 69: Lösungserzeugung: korrigierendes Vorgehen der Versuchsgruppen (N = 66; Replikationsuntersuchung: Entwurfsproblem „Korkenzieher“)

Experimentelle Bedingung	Korrigierendes Vorgehen (in %)	Nacheinander korrigierendes Vorgehen (in %)	Nacheinander korrigierend entwickelte Varianten der nacheinander korrigierend Vorgehenden (MW)
(1) Papier und Bleistift	27,3	4,5	4,0 (kein MW, da nur eine Vp)
(2) Graphiktablett	68,2	22,7	2,0
(3) 2D-CAD	100,0	0	-

8.11 Interpretation der Ergebnisse: Entwurfsproblem „Korkenzieher“

Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill“ an der im Schwierigkeitsgrad vergleichbaren Problemstellung „Korkenzieher“ auf Replizierbarkeit zu testen. Die dazu im Teilkapitel 8.10 dargestellten Ergebnisse werden im folgenden zusammengefasst, interpretiert und integrativ betrachtet.

8.11.1 Homogenisierungsvariablen

Beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ konnten zwischen den drei Versuchsgruppen keine bedeutsamen Unterschiede hinsichtlich der Homogenisierungsvariablen ausgemacht werden. Es darf angenommen werden, dass der Einfluss der Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung sowie der Fähigkeit zur räumlichen Vorstellung auf die abhängigen Variablen bei den einzelnen experimentellen Bedingungen konstant war. Somit war deren Vergleichbarkeit für die weitere Untersuchung gewährleistet.

8.11.2 Bereich der Ergebnisse

Im Rahmen der Replikationsuntersuchung erbrachte ein Vergleich der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen hinsichtlich der Ergebnisvariable „Lösungsgüte“ folgende Resultate:

Die Teilnehmer der experimentellen Bedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift“ und „Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett“ unterschieden sich signifikant in der Lösungsgüte der erstellten Entwürfe. Erstere erzielten hier im Durchschnitt einen signifikant höheren Wert. Die Teilhypothese 4.1.1a ließ sich damit nicht bestäti-

gen und das entsprechende Ergebnis der Problemstellung „Gartengrill“ konnte nicht repliziert werden.

Dieses nicht erwartungskonforme Ergebnis weist auf Unterschiede in den Anforderungen beider Arbeitsmittel an den Entwerfenden hin. Vermutlich tragen die in der mündlichen Nachbefragung erneut von einem Großteil der Teilnehmer genannten problematischen Aspekte der Externalisierung beim Arbeitsmittel „Graphiktablett“ hierfür ursächliche Verantwortung. Diese betrafen Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung und eine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung. So war z. B. der Aufsetzpunkt des Stifts nicht identisch mit dem Punkt des Strichbeginns. Dadurch wurde ebenso wie durch die mangelnde Drucksensitivität des UltraPens eine Nachbearbeitung von Linien notwendig. Der Anstellwinkel des Geräts verhinderte ein zum intuitiven Skizzieren erforderliches adäquates Drehen des „digitalen Papiers“ und veränderte dadurch die Handhaltung und Linienführung. Die Verzögerung zwischen dem Moment der Zeichnungs- bzw. Schrifterzeugung und der visuellen Rückmeldung verlangte vor allem beim Schreiben häufig eine Nachbearbeitung. In der Konsequenz konnten diese Behinderungen und der damit verbundene Mehraufwand das Arbeitsgedächtnis belastet und den Aufbau lösungsbegünstigender mentaler Repräsentationen eingeschränkt haben.

Die negativen Auswirkungen der Behinderungen in der Nutzung des Graphiktabletts wurden eventuell durch die kurze Eingewöhnungszeit der Probanden an das Gerät verstärkt. Keiner der Teilnehmer war zu Versuchsbeginn länger als zehn Minuten an das Arbeiten mit dem Graphiktablett gewöhnt.

Es stellt sich nun die Frage, weshalb sich diese Anforderungsunterschiede beider Arbeitsmittel an den Nutzer beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ nicht in den Ergebnissen zur Lösungsgüte widerspiegelten. Möglicherweise war das Entwurfsproblem „Korkenzieher“ entgegen der Experteneinschätzung (vgl. hierzu Abschnitt 7.4.2) im Schwierigkeitsgrad komplizierter und stellte höhere Anforderungen an die Studierenden. Auf der Grundlage einer höheren erlebten Problemschwierigkeit würden die Anforderungsunterschiede beider Arbeitsmittel zusammen mit der kurzen Einarbeitungszeit die geringere Güte der konstruktiven Entwürfe der Teilnehmer, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, erklären.

Ein Vergleich der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen mit der Gruppe der rechnergestützt Entwerfenden lieferte bezogen auf die Lösungsgüte folgende Ergebnisse:

Die Probanden, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett entwarfen, erzielten eine hochsignifikant bzw. signifikant höhere Lösungsgüte als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Somit

ließ sich die Teilhypothese 4.1.1b bestätigen, und die Befunde der Problemstellung „Gartengrill“ konnten repliziert werden.
Durch dieses Ergebnis wird belegt, dass das Arbeitsmittel „2D-CAD“ zur alleinigen Unterstützung der frühen Entwurfsphasen ungeeignet ist. In diesen Phasen wurde der Entwerfende durch das Design Problem Solving mit Anforderungen konfrontiert, deren Bewältigung durch die Eigenschaften des CAD-Systems – wie in den Abschnitten 2.3.2, 4 und 7.13 dargelegt - nicht unterstützt, sondern im Gegenteil sogar behindert wurde.

Hinsichtlich der zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Korkenzieher“ benötigten Zeit zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Personen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und mit Graphiktablett entwarfen. Die Teilhypothese 4.1.2a konnte folglich bestätigt, und der korrespondierende Befund der Problemstellung „Gartengrill“ repliziert werden.
Die eben diskutierten Unterschiede in den Anforderungen der Arbeitsmittel an den Nutzer hatten somit keine Auswirkungen auf die benötigte Bearbeitungsdauer.

Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren entwarfen, benötigten hochsignifikant weniger Zeit zur Bearbeitung des Entwurfsproblems „Korkenzieher“ als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Bezüglich der Bearbeitungsdauer ließ sich die Teilhypothese 4.1.2b bestätigen, und das Ergebnis der Problemstellung „Gartengrill“ replizieren.
Dieses Ergebnis lässt sich durch die Erfordernisse der Bedienung des CAD-Systems erklären. Da bereits bei der Ersteingabe konkrete Maßangaben erforderlich sind, traten gerade zu Beginn der Lösungserarbeitung längere Abschnitte des Nachdenkens auf. Das zu konstruierende Objekt musste aus geometrieorientierten Elemente zusammengesetzt werden, die zunächst durch eine aufwendige Bedienprozedur mit Maus und Tastatur erzeugt werden mussten. Die von 2D-CAD nur mangelhaft erfüllte Funktion einer Denkhilfe führte zum häufigen Abändern der vorläufigen Entwurfslösung. Fehler wurden aufgrund der vorgeschriebenen Systemlogik oftmals erst sehr spät erkannt. Weitere Faktoren, die die Bearbeitungszeit verlängerten, ergaben sich aus der fehlenden Einheit von Seh- und Handlungsraum und der auch damit verbundenen Verzögerung zwischen Eingabe und visueller Rückmeldung der Information.

Hinsichtlich der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts der Entwürfe an technische Laien und Experten ließen sich signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen (1) und (2) feststellen. Die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett

entwarfen, schnitten hier mit geringeren Werten ab. Damit konnte man die Teilhypothese 4.1.3a nicht bestätigen und das Ergebnis der Problemstellung „Gartengrill“ nicht replizieren.
Auch die Unterschiede in der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ lassen sich auf die unterschiedlichen Anforderungen an den Nutzer bei der Externalisierung zurückführen. Sowohl die Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung als auch die Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung beim Graphiktablett bedingten eine Darstellungsweise, die nicht mit der auf Papier identisch war. Details ließen sich trotz variabler Strichstärke nicht so gut wie mit einem Bleistift darstellen, da die dünnste Strichstärke dicker als ein gespitzter Bleistift ist. Im Gegensatz zum Gartengrill erforderte der Entwurf des Korkenziehers ein detailgenaueres Zeichnen des Objekts, da dieses in seiner Größe deutlich kleiner ist. Eventuell kommen die softwarebedingten Probleme des Graphiktabletts bei zu entwerfenden Objekten von geringer Größe und bei entsprechenden Detailzeichnungen in besonderer Weise zum Tragen.
Der Anstellwinkel des Geräts hatte eine vor allem perspektivisch geringere Skizzierqualität zur Folge. Das häufig erforderliche Nachziehen von Linien und Buchstaben führte zu einer eingeschränkten Eindeutigkeit des Dargestellten und erschwerte dessen Kommunizierbarkeit an weitere Personen. Diese Unterschiede äußerten sich bei der Problemstellung „Gartengrill“ nicht in den Ergebnissen.

Probanden, die durch Freihandskizzieren entwarfen, erreichten sowohl im Hinblick auf die Kooperation mit Laien als auch mit Experten signifikant höhere Werte für die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Die Teilhypothese 4.1.3b konnte somit bestätigt, und das Ergebnis der Problemstellung „Gartengrill“ repliziert werden.
Als Erklärungsmöglichkeit sollen ebenso wie beim ersten Entwurfsproblem die durch die verschiedenartigen Arbeitsmittel möglichen Arten der Darstellung herangezogen werden. Während das Freihandskizzieren sowohl zwei- als auch dreidimensional unproblematisch auf verschiedenen Abstraktionsebenen und in unterschiedlichen Modalitäten erfolgen konnte, war die Darstellung bei AutoCAD in aller Regel zweidimensional, geometrieorientiert und von Anfang an gleichbleibend konkret. Die Dekodierung der rechnergestützt erstellten Darstellung erforderte zumeist das Beherrschen einer fachspezifischen „Sprache“. Dies kann von technischen Laien nicht in ausreichendem Maß geleistet werden. Den Experten fehlten hingegen oft entscheidende Angaben für eine fehlerfreie Interpretation, so dass die Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts rechnergestützter Entwürfe häufig für beide Empfängergruppen eingeschränkt war.

8.11.3 Bereich des Erlebens

Bezogen auf die erlebte Problemschwierigkeit, die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit sowie die psychische Beanspruchung existierten im Rahmen der Replikationsuntersuchung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und mit Graphiktablett entwarfen. Die Teilhypothesen 4.2.1a, 4.2.2a und 4.2.3a konnten damit bestätigt werden. Das bedeutet eine Replikation der entsprechenden Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill".

Die Tatsache, dass die durch Freihandskizzieren entwerfenden Probanden beider Versuchsgruppen auch beim Entwurfsproblem „Korkenzieher" ein vergleichbares Erleben hinsichtlich der Problemstellung, der entwickelten Lösung und der psychischen Beanspruchung aufwiesen, bestätigt die Ähnlichkeit der subjektiven Wahrnehmung dieser beiden Arbeitsmittel. Die in der mündlichen Nachbefragung genannten Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung und die Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung scheinen einen überschaubaren Einfluss auf das Erleben der Probanden gehabt zu haben. Diese negativen Aspekte lassen sich durch den Einsatz einer komplexeren Software beheben oder zumindest abschwächen.

Ein Vergleich aller drei Versuchsgruppen bezogen auf die Variablen des Erlebens erbrachte folgende Ergebnisse:

Hinsichtlich der erlebten Problemschwierigkeit ließen sich zwischen den durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsteilnehmern und im Umgang mit CAD ausgebildeten Probanden, die rechnergestützt entwarfen, keine bedeutsamen Unterschiede feststellen. Erstere erlebten das Entwurfsproblem „Korkenzieher" nicht als signifikant weniger schwierig. Die Teilhypothese 4.2.1b konnte folglich nicht bestätigt werden. Dieses Ergebnis repliziert den Befund zur erlebten Problemschwierigkeit beim Entwurfsproblem „Gartengrill".

Als Erklärungsmöglichkeiten kommen dieselben Punkte wie bei der Problemstellung „Gartengrill" in Betracht. Eine eventuelle Falscheinschätzung der Anforderungsunterschiede des Arbeitsmittels „2D-CAD" an den Nutzer soll aufgrund der im Teilkapitel 2.3 geschilderten Beschreibungen nicht weiter behandelt werden. Vielmehr wird auch in diesem Fall davon ausgegangen, dass die rechnergestützt entwerfenden Teilnehmer mit deutlichen höheren Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis, den Aufbau mentaler Problemrepräsentationen und das Externalisieren konfrontiert waren. Die aufgrund der kognitiven Mehrbelastung denkbaren Folgen in Form von „Notfalloperationen" und Vereinfachungen dürften auch zu der durchschnittlich geringeren Lösungsgüte bei der Versuchsgruppe (3) geführt haben.

Vergleicht man die einzelnen Versuchsgruppen beider Problemstellungen hinsichtlich ihrer für die Problemschwierigkeit abgegebenen Wertungen, so fällt auf, dass das Entwurfsproblem „Korkenzieher“ mit einem durchschnittlichen Wertunterschied von 0,8 bis 1,5 als schwieriger erlebt wurde. Während die Problemstellung „Gartengrill“ tendenziell als eher weniger schwierig eingestuft wurde, erlebten die Probanden die Problemstellung „Korkenzieher“ insgesamt als eher durchschnittlich schwierig. Die im Rahmen der Interpretation der Ergebnisse des ersten Entwurfsproblems angesprochene Problematik der fehlenden alternativen Problemstellung war in der Replikationsuntersuchung nicht mehr gegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Untersuchungsteilnehmer die Schwierigkeit der Problemstellung „Korkenzieher“ im Vergleich zum Gartengrill einschätzten. Dieser höhere erlebte Schwierigkeitsgrad der Problemstellung „Korkenzieher“ hat vermutlich die negativen Auswirkungen der Behinderungen in der Nutzung des Graphiktabletts erst zu Tage treten lassen. Dadurch dürften sich die Unterschiede in der Lösungsgüte dieser beiden Versuchsgruppen erklären lassen.

Bezogen auf die Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit zeigte sich ein bedeutsamer Unterschied zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und im Umgang mit CAD ausgebildeten Versuchsteilnehmern, die rechnergestützt entwarfen. Die erste Versuchsgruppe war sich im Bezug auf die Richtigkeit ihrer Lösung signifikant sicherer. Die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwerfenden Probanden unterschieden sich jedoch in ihrer Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit nicht signifikant von den mit AutoCAD Entwerfenden. Damit ließ sich die Teilhypothese 4.2.2b nur teilweise bestätigen. Der Befund der Problemstellung „Gartengrill“ konnte nicht gänzlich repliziert werden.

Der hypothesenkonforme signifikante Unterschied zwischen den Personen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und den mit AutoCAD Entwerfenden belegt die in den Kapiteln 2.3 und 4 diskutierten, deutlichen Unterschiede zwischen diesen Arbeitsmitteln. Die Probanden der ersten experimentellen Bedingung erlangten durch die Möglichkeit des raschen, intuitiven Arbeitens und durch die Funktionen der Denk-, Lösungs- und Analysehilfe des Arbeitsmittels „Papier und Bleistift“ ein tiefergehendes Problemverständnis. Dieses führte letztlich zu einer stärkeren Sicherheit im Bezug auf die Lösungsrichtigkeit.

Der nicht vorhandene signifikante Unterschied zwischen den durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett und den mit AutoCAD Entwerfenden spricht zum ersten für Anforderungsunterschiede der Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ an die Nutzer. Diese konnten die Problemstellung „Korkenzieher“ mit Papier und Bleistift so bearbeiten, dass daraus eine verstärkte Sicherheit im Hinblick auf die Richtigkeit der Lösung resultierte. Für das Er-

gebnis sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die im Rahmen der Externalisierung diskutierten (vgl. Teilkapitel 4.3) und von den Probanden in der mündlichen Nachbefragung genannten Problempunkte des Graphiktabletts verantwortlich.
Zum zweiten könnte die unvergleichlich geringere Einarbeitungszeit in das Arbeitsmittel „Graphiktablett“ von Bedeutung sein. Unsicherheiten in der Bedienung haben möglicherweise zu einer geringeren Sicherheit hinsichtlich der Lösungsrichtigkeit beigetragen.

Entgegen der Teilhypothese 4.2.3b erlebten die Versuchspersonen, die durch Freihandskizzieren entwarfen, keine signifikant geringere psychische Beanspruchung als im Umgang mit CAD ausgebildete Probanden, die rechnergestützt entwarfen. Dieses Ergebnis stellt eine Replikation des Befundes der Problemstellung „Gartengrill“ dar.
An dieser Stelle soll die Bearbeitungsdauer als Begründung aufgegriffen werden. Diese betrug beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ ebenso maximal 120 Minuten und war eventuell nicht ausreichend, um bei den Nutzern des Arbeitsmittels „2D-CAD“ eine erhöhte psychische Beanspruchung nachzuweisen. Der Vergleich der Arbeitsmittel sollte deshalb in einer weiteren Untersuchung an einer komplexeren und auch komplizierteren Problemstellung vorgenommen werden, für die eine längere Bearbeitungszeit benötigt wird. Zudem empfiehlt sich dann die Erfassung objektiver Kriterien, wie etwa der Herzschlag- und Atemfrequenz.

8.11.4 Bereich des Prozesses

Ein Vergleich der Versuchsgruppen (1) und (2) im Rahmen der Replikationsuntersuchung erbrachte bei der Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Teiltätigkeiten“ folgende Resultate:
Zwischen den Probanden, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und denjenigen, die ihn mit Graphiktablett entwarfen, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Anteile der während der Lösungserarbeitung ausgeführten Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit. In der ersten Versuchsgruppe gestikulierten jedoch auffallend mehr Probanden.
Im Bezug auf die Abfolgen der Teiltätigkeiten zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bei den Wechseln „Aufgabenstudium – externe bzw. interne Teiltätigkeit“. Beide Versuchsgruppen unterschieden sich jedoch signifikant hinsichtlich der Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“. Die Personen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, wechselten signifikant häufiger zwischen externen und internen Teiltätigkeiten. Die Teilhypothese 4.3.1a konnte folglich bis auf diese Einschränkung bestätigt werden. Die Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill“ ließen sich weitgehend replizieren.

Die Vergleichbarkeit der Anteile der Teiltätigkeiten sowie der Wechsel „Aufgabenstudium – externe bzw. interne Teiltätigkeit“ beweist, dass der beobachtbare Entwurfsprozess des Freihandskizzierens mit beiden Arbeitsmitteln größtenteils identisch abläuft.
Die Tatsache, dass in der zweiten Versuchsgruppe auffallend weniger Personen gestikulierten, kann eventuell durch jene die Externalisierung betreffenden Aspekte des Graphiktabletts erklärt werden. Gezielte Bewegungen mit Fingern, Händen oder mit in der Hand gehaltenem Stift in der Luft bzw. auf dem Papier erfordern als Probehandeln die Möglichkeit einer reibungslosen, intuitiven Externalisierung. Gerade hier hat jedoch ein Großteil der Teilnehmer Einschränkungen durch Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung gegenüber Papier und durch eine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung erlebt.
Als Grund für die durchschnittlich geringere Anzahl der Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“ bei der Versuchsgruppe, die mit Graphiktablett entwarf, müssen ebenfalls die Einschränkungen dieses Arbeitsmittels im Bereich der Externalisierung angenommen werden. Vor allem die Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung dürfte einen raschen, unproblematischen Wechsel zwischen internalem und externalem Handeln unterbrochen haben.

Ein Vergleich aller drei Versuchsgruppen bezüglich der Anteile der Teiltätigkeiten an der Bearbeitungszeit erbrachte folgendes Bild:
Bis auf die Teiltätigkeiten „Aufgabenstudium“ und „Betrachten“ zeigten sich mindestens zwischen einer der durch Freihandskizzieren entwerfenden Versuchsgruppen und den rechnergestützt entwerfenden Probanden signifikante Unterschiede.
Hinsichtlich der Abfolgen wichen die ersten beiden Versuchsgruppen bei den Wechseln „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit“ nicht signifikant von den Teilnehmern ab, die den Korkenzieher mit AutoCAD entwarfen. Bei den Wechseln „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ und „Externe – interne Teiltätigkeit“ unterschieden sich die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, von den rechnergestützt Entwerfenden, indem sie signifikant und hochsignifikant häufiger wechselten. Die Teilhypothese 4.3.1b konnte somit nur teilweise bestätigt werden. Die Ergebnisse des Entwurfsproblems „Gartengrill“ ließen sich nicht entsprechend replizieren.
Das Betrachten der selbsterstellten Skizze bzw. Zeichnung fiel sowohl in skizzierenden als auch in rechnergestützten Entwurfsprozessen als interne Haupttätigkeit auf. Dies erklärt die diesbezüglich vergleichbaren prozentualen Anteile und den fehlenden bedeutsamen Unterschied zwischen den Versuchsgruppen.

Das Skizzieren bzw. Zeichnen zählte bei allen drei Versuchsgruppen als externe Haupttätigkeit im Entwurfsprozess. Der hochsignifikant größere Anteil der rechnergestützt Entwerfenden im Vergleich zu den durch Freihandskizzieren entwerfenden Personen spricht für den Mehraufwand bei der Bedienung des CAD-Systems zum Zweck der Entwurfserstellung.
Dies wird durch das Ergebnis zur Teiltätigkeit „Keine sichtbare Aktivität" bestärkt: Die mit AutoCAD entwerfenden Probanden zeigten signifikant seltener keine sichtbare Aktivität. Vielmehr mussten sie diese Zeit, in der bei den durch Freihandskizzieren entwerfenden Teilnehmern von einer Phase des Nachdenkens ausgegangen werden kann, für die Bedienung des Programms aufbringen.
Die ersten beiden Versuchsgruppen notierten hochsignifikant mehr Text. Der Modalitätenwechsel vom Bildlichen ins Begriffliche war hierbei ohne Aufwand möglich, wohingegen das Erstellen von Text beim rechnergestützten Entwerfen die Bedienung entsprechender Funktionalitäten erforderte.
Hinsichtlich der Teiltätigkeit „Radieren bzw. Löschen" war bei den rechnergestützt entwerfenden Probanden im Vergleich zu den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, ein hochsignifikant größerer Anteil erkennbar. Die Vorgehensweise beim Entwerfen mit AutoCAD erforderte ein häufiges Anpassen der generierten Elemente. Auch Verwerfungen traten regelmäßig auf. Das digitale Löschen ist im Gegensatz zum Radieren auf Papier problemlos ohne negative Konsequenzen möglich und wird daher häufiger ausgeführt.
Die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett Entwerfenden unterschieden sich im Hinblick auf das Radieren bzw. Löschen von keiner der beiden anderen Versuchsgruppen signifikant. Auch hier kann digital ohne sichtbare Folgen radiert werden; der Radiervorgang ist jedoch angelehnt an denjenigen mit einem realen Radiergummi. In der Regel wurde beim Freihandskizzieren eher weniger radiert, da das im Vergleich zum rechnergestützten Entwerfen geringere Maß an darstellerischer Konkretheit auch eine geringere Exaktheit und Sauberkeit erforderte. Die zu ändernde Form wurde stattdessen mit dem Stift entsprechend modifiziert.
Gestikuliert wurde beim rechnergestützten Entwerfen von deutlich weniger Probanden als beim Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift bzw. mit Graphiktablett. Diese Unterschiede lassen sich durch die fehlende Möglichkeit eines intuitiven und raschen Vorgehens bei der Bedienung eines CAD-Systems erklären.

Die Befunde der drei Versuchsgruppen im Hinblick auf die Abfolgen der Teiltätigkeiten können folgendermaßen interpretiert werden:
Bei den Wechseln „Aufgabenstudium – externe Teiltätigkeit" ließen sich keine signifikanten Unterschiede nachweisen. Das Skizzieren bzw. Zeichnen war sowohl beim Entwerfen durch

Freihandskizzieren als auch beim Entwerfen mit AutoCAD die externe Hauptaktivität, so dass die vergleichbare Anzahl an Wechseln zwischen dem Lesen und dem darauffolgenden Externalisieren nicht weiter verwundert.
Hinsichtlich der durchgeführten Wechsel „Aufgabenstudium – interne Teiltätigkeit“ ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und den rechnergestützt Entwerfenden insoweit, dass erstere diesbezüglich signifikant häufiger wechselten. Dies lässt sich durch den signifikant höheren Prozentanteil der Versuchsgruppe (1) bei der Teiltätigkeit „Keine sichtbare Aktivität“ erklären. Zusammen mit der Teiltätigkeit „Betrachten“ hatten diese Teilnehmer einen erheblich längeren Anteil an mentalen Phasen, wenn man davon ausgeht, dass in den Abschnitten der äußeren Inaktivität im Sinne des internalen Handelns gedacht wurde.
Bezogen auf die Wechsel „Externe – interne Teiltätigkeit“ zeigte sich ein hochsignifikanter Unterschied zwischen den Teilnehmern, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und den rechnergestützt Entwerfenden. Erstere wechselten signifikant häufiger zwischen externen und internen Teiltätigkeiten. Als Grund für dieses auffällige Wechselspiel lässt sich die durch das Freihandskizzieren ermöglichte Arbeitsweise heranziehen, bei der die Tätigkeit des Skizzierens in Verbindung mit der selbsterstellten Skizze als Denk-, Lösungs- und Analysehilfe gilt.
Die Versuchsgruppe, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarf, unterschied sich in beiden letztgenannten Fällen nicht signifikant von der dritten Versuchsgruppe. Vermutlich kommt den von der Mehrheit der Probanden in der mündlichen Nachbefragung berichteten Unzulänglichkeiten des Graphiktabletts hinsichtlich der Externalisierung eine wichtige Rolle bei der Erklärung dieses Sachverhalts zu. Diese im Kapitel 4 diskutierten Behinderungen haben eventuell eine Reduzierung des beim Entwerfen durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift auffälligen Wechselspiels zwischen internalem und externalem Handeln veranlasst.

Um Informationen über die Anteile und Abfolgen der während der Lösungserarbeitung getätigten Entwurfsschritte zu erhalten, wurde ebenso wie beim Entwurfsproblem „Gartengrill“ ein Extremgruppenvergleich durchgeführt. Die drei Probanden der Extremgruppe mit den höchsten Lösungsgütewerten und den kürzesten Bearbeitungszeiten hatten durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entworfen, während die Probanden der Extremgruppe mit den geringsten Lösungsgütewerten und den längsten Bearbeitungszeiten AutoCAD genutzt hatten. Dieses Ergebnis bestätigt die obengenannten Befunde zur Lösungsgüte und Bearbeitungszeit der experimentellen Bedingungen.

In der ersten Extremgruppe nahm das Generieren mit knapp 30 % den größten Anteil ein. Daneben wurde mit Anteilen von über 20 % angepasst und bereitgestellt. Die internalen Schritte waren zumeist Planungsschritte. Im Gegensatz dazu generierten und planten die Probanden der zweiten Extremgruppe mit einem Anteil von je etwa 5 % extrem selten. Auffällig war dagegen das deutlich häufigere Bereitstellen. Auch wurde - verglichen mit der ersten Extremgruppe - erheblich mehr kontrolliert und verworfen.
Die Unterschiede in der Verteilung der Entwurfsschritte bei den Extremgruppen entsprachen den verschiedenartigen Vorgehensweisen beim Entwerfen mit den entsprechenden Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „AutoCAD“. Der hohe Anteil an Generierungsschritten bei den Personen der ersten Extremgruppe wird durch die Merkmale des Freihandskizzierens ermöglicht. Mentale Problemrepräsentationen und „Bedienoperationen“ sind kompatibel. Durch die Einheit von Seh- und Handlungsraum, die überflüssige sensumotorische Übersetzung und die Verzögerungsfreiheit zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung ließen sich die Lösungsgedanken rasch und intuitiv externalisieren.
Die Lösungserarbeitung mit dem CAD-System erforderte hingegen durch die Systemlogik ein permanentes Kontrollieren, Anpassen und auch Verwerfen des bisherigen Entwurfs. Geometrieorientierte Lösungselemente wurden generiert und nach erfolgter Handlungskontrolle immer wieder angepasst oder auch verworfen.
Im Bezug auf die Abfolgen der Entwurfsschritte konnten bei dem Fallbeispiel der ersten Extremgruppe sowohl zu Beginn als auch im fortgeschrittenen Entwurfsprozess häufig Generierungen mit vorausgehenden Planungsphasen festgestellt werden. Nach anfänglichem Generieren fanden auch Anpassungen statt.
Der rechnergestützt entwerfende Proband aus dem zweiten Fallbeispiel passte bereits zu Beginn der Lösungserstellung nach wenigen Generierungsschritten mehrheitlich an und verwarf nach dazwischengeschalteten Kontrollschritten wieder. Im Laufe des Entwurfsprozesses wurde in den Denkphasen ausschließlich kontrolliert. In der Folge fanden Anpassungsschritte statt. Diese Schrittfolgen deuten auf eine erheblich weniger kreative und innovative Vorgehensweise beim rechnergestützten Entwerfen hin.
Insgesamt betrachtet, stimmten bei der Problemstellung „Korkenzieher“ sowohl die Anteile als auch die Abfolgen der Entwurfsschritte beider Extremgruppen mit denen der Problemstellung „Gartengrill“ weitgehend überein.

Im Hinblick auf die Lösungserzeugung zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Probanden, die den Korkenzieher durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift entwarfen, und denjenigen, die das Graphiktablett zur Entwurfserstellung nutzten. In der ersten Versuchsgrup-

pe entwickelten zu Beginn erheblich mehr Personen Lösungsalternativen, bevor sie sich für eine Möglichkeit entschieden, die sie weiter ausarbeiteten. In der zweiten Versuchsgruppe fand sich hingegen bei auffallend mehr Personen ein Vorgehen, bei dem nacheinander in korrigierender Weise mindestens eine weitere Variante entwickelt wurde. Die Teilhypothese 4.3.2a ließ sich folglich nicht bestätigen. Die entsprechenden Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill" konnten nicht repliziert werden.
Als Erklärungsmöglichkeit kann zum ersten der Punkt der unterschiedlich langen Eingewöhnungszeiten in beide Arbeitsmittel dienen. Zum zweiten muss man den Aspekt der softwarebedingten Behinderungen bei der Externalisierung mit dem Graphiktablett beachten. Beide Sachverhalte wurden an dieser Stelle beim Entwurfsproblem „Gartengrill" bereits ausführlich behandelt. Die bereits bei der ersten Problemstellung sichtbare Tendenz, dass die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwerfenden Probanden in weniger Fällen ein generierendes Vorgehen zeigten, trat in der Problemstellung „Korkenzieher" verstärkt als deutlicher Unterschied auf. Unter Einbeziehung der durch die Teilnehmer erlebten höheren Problemschwierigkeit lässt dies darauf schließen, dass sich das Entwurfsproblem „Korkenzieher" hinsichtlich seines Schwierigkeitsgrads als komplizierter gestaltete.

Ein Vergleich aller drei Versuchsgruppen im Bezug auf die Lösungserzeugung ergab in der Replikationsuntersuchung folgendes:
Die Versuchspersonen, die mit AutoCAD entwarfen, zeigten ebenso wie bei der Problemstellung „Gartengrill" allesamt ein korrigierendes Vorgehen. Es wurden auch nacheinander durch korrigierendes Vorgehen keine weiteren Lösungsmöglichkeiten entwickelt. Damit unterschied sich die dritte Versuchsgruppe deutlich von den Versuchsgruppen (1) und (2). Dieser Befund bestätigt die Teilhypothese 4.3.2b und repliziert das korrespondierende Ergebnis des ersten Entwurfsproblems. Die hierfür möglichen Gründe, die ursächlich in der Systemlogik und Hardware von CAD liegen, wurden bereits im Abschnitt 8.9.4 erläutert.

Zusammenfassend ließen sich bei der Problemstellung „Korkenzieher" die Teilhypothesen 4.1.1b, 4.1.2a und b und 4.1.3b, die den Bereich der Ergebnisse betrafen, bestätigen. Damit konnten die diesbezüglichen Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill" repliziert werden.
Die Teilhypothesen 4.1.1a und 4.1.3a konnten nicht bestätigt, und damit die entsprechenden Befunde des Entwurfsproblems „Gartengrill" nicht repliziert werden.
Die Teilhypothesen 4.2.1a, 4.2.2a und 4.2.3a, die den Vergleich der ersten beiden Versuchsgruppen im Bereich des Erlebens betrafen, konnten bestätigt werden. Dies bedeutet eine Replikation der entsprechenden Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill". Nicht oder nur teil-

weise bestätigen ließen sich die entsprechenden Teilhypothesen 4.2.1b, 4.2.2b und 4.2.3b. Auch hier konnten die Ergebnisse des ersten Entwurfsproblems größtenteils erfolgreich repliziert werden.

Die Ergebnisse im Bereich des Prozesses zeigten sich teilweise hypothesenkonform: Bestätigt werden konnten die Teilhypothesen 4.3.1a und 4.3.2b. Dadurch wurden die entsprechenden Befunde des ersten Entwurfsproblems repliziert.

Die Teilhypothesen 4.3.1b und 4.3.2a konnte man nicht oder nur teilweise bestätigen. Die Replikation der diesbezüglichen Resultate der Problemstellung „Gartengrill“ war somit nur eingeschränkt erfolgreich.

9 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen

9.1 Zusammenfassende Diskussion beider Problemstellungen

Die Ergebnisse zum Vergleich der Untersuchungsbedingungen „Entwerfen durch Freihandskizzieren“ mit den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ erwiesen sich bei der Problemstellung „Gartengrill“ als hypothesenkonform. Hier zeigten sich weder im Bereich der Ergebnisse, noch im Bereich des Erlebens und des Prozesses wirklich bedeutsame Unterschiede. Die im Kapitel 4 diesbezüglich diskutierten hypothetischen Anforderungsgemeinsamkeiten konnten folglich empirisch bestätigt werden.

Auffallend waren die von der rechnergestützt entwerfenden Versuchsgruppe erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Ergebnis- und Prozessvariablen. Sie fielen mit teilweise hochsignifikanten Unterschieden im Vergleich zu den durch Freihandskizzieren entwerfenden Gruppen auf jeden Fall erwartungsgemäß aus. Es zeigte sich eine starke qualitative und quantitative Leistungsminderung, die ähnliche Untersuchungsergebnisse von Müller & Luczak (1988) sowie Frieling & Derisavi-Fard (1990) bestätigt. Probanden, die den Gartengrill mit AutoCAD entwarfen, erstellten in einer deutlich längeren Bearbeitungszeit, einen Entwurf mit erheblich geringerer Lösungsgüte und Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts. Dies kann als empirischer Beleg für die angenommenen Unterschiede des Arbeitsmittels „2D-CAD“ in seinen Anforderungen an den Nutzer gelten.

Diese Ergebnisse konnten an der Problemstellung „Korkenzieher“ nur teilweise repliziert werden. Die Probanden, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen, benötigten zwar im Vergleich zu denjenigen, die mit Papier und Bleistift arbeiteten, nicht mehr Zeit zur Bearbeitung des Entwurfsproblems. Sie erreichten aber eine signifikant geringere Lösungsgüte und Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts bei ihren Entwürfen. Auch hinsichtlich der Prozessvariable „Lösungserzeugung: generierendes vs. korrigierendes Vorgehen“ zeigten sich Unterschiede zu Ungunsten der Personen, die durch Freihandskizzieren mit Graphiktablett entwarfen. Die Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill“ konnten damit hinsichtlich dieser Ergebnis- und Prozessvariablen nicht repliziert werden.

Als Grund müssen Unterschiede zwischen den Arbeitsmitteln „Papier und Bleistift“ und „Graphiktablett“ im Hinblick auf die Externalisierung angenommen werden. Diese betreffen vor allem Veränderungen von Routinen der taktil-kinästhetischen Bewegungssteuerung und eine Verzögerung zwischen Sensumotorik und visueller Rückmeldung und lassen sich auf die beim Graphiktablett verwendete Software zurückführen.

Von grundlegender Bedeutung für die teilweise gescheiterte Replikation scheint der Schwierigkeitsgrad der Anforderungsstruktur des Entwurfsproblems „Korkenzieher“ zu sein. Dieser ist eventuell entgegen der Experteneinschätzung nicht mit dem des Entwurfsproblems „Gartengrill“ vergleichbar. Die zweite Problemstellung wurde von den Probanden als schwieriger erlebt. Auf einen derartigen Unterschied im Schwierigkeitsgrad lassen auch die Ergebnisse schließen.
Der Vergleich zwischen den Versuchsgruppen, die durch Freihandskizzieren mit Papier und Bleistift und mit Graphiktablett entwarfen, und der rechnergestützt entwerfenden Gruppe erbrachte auch beim Entwurfsproblem „Korkenzieher“ weitgehend hypothesenkonforme Befunde. Die Replikation der Ergebnisse der Problemstellung „Gartengrill“ kann diesbezüglich als gelungen bezeichnet werden.

Ein wesentliches Anliegen dieser Untersuchung bestand darin, neben der Analyse des sichtbaren externalen Handelns Aussagen zu den Denkinhalten und -verläufen der Nutzer verschiedenartiger Arbeitsmittel zu gewinnen. Als Untersuchungsmethodik wurde dazu ein Kategorienschema entwickelt, das es erlaubt, sowohl die externalen als auch die internalen Schritte entsprechend ihrer Funktionen im Entwurfsprozess genauer zu spezifizieren. Dieses wurde bei beiden Problemstellungen im Rahmen eines Extremgruppenvergleichs, der auf den Ergebnisvariablen Lösungsgüte und Bearbeitungszeit basierte, erprobt.
Betrachtet man die entsprechenden Resultate im Vergleich, so lässt sich feststellen, dass die Extremgruppen mit den sehr hohen Werten für die Lösungsgüte bei kurzen Bearbeitungszeiten ausnahmslos aus freihandskizzierenden Teilnehmern bestanden. Auffällig in diesen Gruppen waren häufige Wechsel zwischen mentalen Planungs- und materialisierenden Generierungsphasen, die in der Regel bis zur Fertigstellung der Lösung anhielten.
Die Extremgruppen mit den sehr geringen Werten für die Lösungsgüte bei langen Bearbeitungszeiten setzten sich ausschließlich aus rechnergestützt entwerfenden Probanden zusammen. Hier wurde im Gegensatz dazu viel bereitgestellt, kontrolliert und auch verworfen. Diese Schrittfolgen sind ein Indikator für ein erheblich weniger kreatives und innovatives Vorgehen beim Entwerfen mit AutoCAD.
Externale wie internale Teiltätigkeiten – z. B. das Skizzieren bzw. Zeichnen, das Betrachten der Skizze bzw. Zeichnung oder die äußere Inaktivität – können unterschiedliche Funktionen im Handlungsprozess haben, die mit dem gewählten methodischen Zugang näher bestimmbar waren. Insgesamt betrachtet, hat sich die Erfassung der Entwurfsschritte mit dem entwickelten Kategorienschema als sinnvolles Verfahren erwiesen, gerade um Rückschlüsse auf den Inhalt des beim Entwerfen vollzogenen internalen Handelns zu ziehen. Die Methode erzielte nach

einem eingehenden Beobachtertraining hohe Werte für die interpersonale Urteilerübereinstimmung und kann daher als objektiv und tragfähig im Hinblick auf ihre Verwendung in weiteren Untersuchungen eingestuft werden.

Als Fazit lässt sich zusammenfassen: „Es bleibt ... festzustellen, dass der Konstrukteur zur Abbildung eines neu zu entwickelnden Produkts mit Hilfe von konventionellen 2D-CAD-Systemen einen nicht unwesentlichen Teil seiner Denkkapazität zur Eingabe von Informationen in das System verwenden muss. Die Arbeitstechnik des Zusammensetzens der Darstellung des gewünschten Produkts aus relativ einfachen (Zeichnungs-)Elementen auf dem Bildschirm verführt außerdem zu einem Vorgehen vom Detail zum Ganzen, welches zur effizienten Bearbeitung konstruktiver Aufgabenstellungen nicht geeignet ist“ (Lippardt, 2000, 90). Das in den frühen Phasen übliche schrittweise Entwickeln von Lösungen erfordert ein permanentes Auslagern von Denkresultaten. Nur so ist eine den Entwurf fördernde Interaktion mit diesen möglich. Objektivierte Ideen geben einen größeren Anstoß, sich damit zu beschäftigen.
Skizzen dienen dem Entwickeln von Lösungen, CAD eher derem Darstellen. Das Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ und mit der entsprechenden Software in wohl adäquater Weise auch das Graphiktablett sind für eine Unterstützung der qualitäts- und kostenbestimmenden frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens von essentieller Bedeutung.

9.2 Aussagefähigkeit der Ergebnisse

Die frühen Phasen des Entwerfens sollten in der vorliegenden Arbeit möglichst realitätsnah erfasst werden. Aus bereits genannten Gründen (vgl. Abschnitt 7.3) wurden jedoch keine realen Entwurfsprozesse, sondern ausschließlich das Entwerfen in einer Laborsituation untersucht. Im folgenden soll auf einige untersuchungskritische Anmerkungen hingewiesen werden, die bei der Interpretation der Ergebnisse und der Übertragbarkeit auf reale Entwurfsprozesse zu berücksichtigen sind.

9.2.1 Einschränkungen aufgrund der Problemstellungen

Für das Untersuchungsvorhaben wurden konstruktive Problemstellungen ausgewählt, die zur Beantwortung der interessierenden Fragestellungen unter Einbeziehung des Versuchskontextes und der Stichprobe geeignet erschienen. Sowohl das Entwurfsproblem „Gartengrill“ als auch der „Korkenzieher“ erforderten ein selbständiges Finden von Lösungsprinzipien. Allerdings handelte es sich bei beiden Entwurfsaufträgen um geometrieorientierte Probleme ohne Berech-

nungs- und Auslegungsanteil, die in dieser vereinfachten Form in der Praxis im allgemeinen nicht vorliegen.

Die durchgeführten Versuche umfassten ausschließlich die generative Neuerstellung von Zeichnungen; bei CAD-Systemen nutzbare, zeitsparende Techniken - wie der Einsatz von Norm- und Wiederholteilbibliotheken - kamen nicht zum Einsatz.

Bei den erzeugten Entwurfslösungen handelte es sich aufgrund der Instruktion um ausreichend ausgearbeitete Lösungskonzepte, die sich je nach Detaillierungsgrad der späten Konzeptphase oder der frühen Entwurfsphase zuordnen ließen. Dennoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Beurteilung der Lösungsgüte von Entwürfen aus zweierlei Gründen als kritisch einzustufen ist: Erstens würde eine weitere Ausarbeitung möglicherweise zu Korrekturen führen, die die Güte einzelner Lösungen verbessern. Zweitens zeigt sich die Qualität von Entwürfen streng genommen erst in der Fertigung und Nutzung des Produkts, z. B. in Form von Marktakzeptanz und Kundenzufriedenheit.

9.2.2 Einschränkungen aufgrund der Untersuchungsmethoden

Die isolierte Laborsituation mit kontrollierbaren Randbedingungen gewährleistet nur eine eingeschränkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis, da die Einbindung des Entwurfsprozesses in den organisatorischen Kontext unberücksichtigt bleibt. Die Probanden arbeiteten in einer für sie ungewohnten Umgebung unter Beobachtung der Versuchsleiterin und einer Videokamera. Ein kommunikativer Austausch mit anderen Personen war nicht möglich.

Auch lag zwischen dem Erhalt des Konstruktionsauftrags und der Lösungserzeugung keine Inkubationsphase, d. h., die einzelnen Phasen des kreativen Prozesses (vgl. z. B. Linneweh, 1991; Rössler & Blach, 1998) konnten in der Versuchssituation durch die Probanden zeitlich nicht konsequent auseinandergehalten werden.

Als Probanden dienten aus Verfügbarkeits- und Kostengründen Studierende der Fakultät Maschinenwesen im Hauptstudium. An dieser Stichprobe gewonnene Ergebnisse liefern Aussagen über den derzeitigen Stand der Konstruktionsausbildung und erlauben Vorschläge zu deren Veränderung. Andererseits begrenzen studentische Versuchspersonen die Übertragbarkeit der Befunde auf die konstruktive Praxis. Ferner stellt sich trotz der strengen Beachtung der genannten Homogenitätskriterien die Frage, ob die aus verschiedenen Studienrichtungen zusammengesetzte Stichprobe in allen relevanten Belangen - wie etwa der Erfahrung mit CAD oder der Fertigkeiten im Skizzieren - vergleichbar war. Die teilnehmenden Studierenden des Technischen Designs mussten z. B. als Zulassungsvoraussetzung einen Eignungstest durchlaufen und beschäftigten sich in einem mehrsemestrigen Skizzierkurs intensiv mit dem Skizzieren.

Weiterhin ist kritisch anzumerken, dass die Gewöhnungszeit an die Nutzung der drei Arbeitsmittel zum Untersuchungszeitpunkt sehr unterschiedlich lang war: Während das Arbeitsmittel „Papier und Bleistift“ von Kindheit an Verwendung findet, waren die Probanden die Nutzung von CAD nur mindestens zweieinhalb Jahre gewohnt. Die Einarbeitungszeit der Probanden, die mit dem Graphiktablett entwarfen, betrug lediglich zehn Minuten. Eine tiefergehende Betrachtung der Eingewöhnungszeit als mögliche Kovariable schien jedoch aus zwei Gründen nicht notwendig: Zum ersten waren diese unterschiedlichen Gewöhnungszeiten an die Nutzung der Arbeitsmittel für alle Teilnehmer gleich bzw. vergleichbar. Zum zweiten wird der Einwand durch die Ergebnisse, die vor allem hinsichtlich der Ergebnisvariablen ein deutlich besseres Abschneiden des Graphiktabletts im Vergleich zu CAD zeigen, entkräftet.

Die verwendete experimentelle Methodik basiert auf Rückschlüssen von äußerem auf inneres Handeln, d. h., die Tätigkeit des beobachtbaren Entwerfens mit unterschiedlichen Arbeitsmitteln gilt als „window to the cognitive process“ (Ullman et al., 1990). Diese Problematik fasst Görner (1994, 236f.) zusammen: „Die Aufklärung der psychischen Struktur des Konstruierens ist deshalb eine komplizierte Aufgabe, weil aus der denkpsychologischen Forschung kaum Hinweise zur Analyse von Problemen einer vergleichbaren Komplexität zu entnehmen sind. ... Bei dem Rückschluss von Handlungsfolgen auf dahinter stehende psychische Vorgänge kann nicht der Anspruch erhoben werden, alle Denkvorgänge zu erfassen,... . Das ist ein prinzipieller Mangel, dem aber entgegensteht, dass offenbar die wesentlichen, den Fortgang des Denkprozesses bestimmenden Gedanken dadurch doch erschlossen werden können“ (s. dazu auch Rouse & Morris, 1986).

9.3 Beitrag der Ergebnisse zur Konstruktionsausbildung

Die Stichprobe der vorliegenden Untersuchung setzte sich aus Studierenden zusammen, die im Hinblick auf das Entwerfen noch nicht über hochautomatisierte Fertigkeiten verfügten. Die während des Lernprozesses der konstruktiven Ausbildung angeeigneten Formen der Arbeitsmittelnutzung und die damit verbundenen geforderten Fähig- und Fertigkeiten lassen bedeutsame Konsequenzen für die spätere Berufsausübung vermuten. So kann z. B. davon ausgegangen werden, dass sich die bei CAD eingeschränkte Alternativensuche mit der Zeit verfestigt.
Bisher wurden die Schwerpunkte von Lehre und Forschung überwiegend auf mathematisierbare und algorithmierbare Aufgabenbereiche beschränkt. Hönisch (1993) beklagt, dass in der universitären Konstruktionsausbildung nach wie vor die Gestaltung und Optimierung relativ einfacher, abgegrenzter Bauteile im Vordergrund stehen. Die Defizite bestehen in der fehlenden

Anleitung zur Lösung von Problemen und der „generellen Unterschätzung der Ideenfindung gegenüber allem Quantifizierbaren“ (Hönisch, 1993, 299). Durch das rechnergestützte Entwerfen werden verschiedene Fähigkeiten und Fertigkeiten des motorischen Systems - etwa das „denkende Tun der Hände“ (Jaspers, 1983, 359; vgl. auch Giese, 1928; Gebauer, 1984; Cakir, 1996; Engeln, 1997; Weinmann, 1999) - kaum noch in Anspruch genommen: „ … in dem nicht mehr notwendigen Gebrauch der Hand bei der Handhabung von Technologien liegt die Ursache der Verkümmerung von Denken (binäre Logik), Erleben (soziale Isolation) und Handeln (gestische Reduktion)“ (Wehner, 1990, 74).
Je mehr Repräsentationsarten ein Konstrukteur nutzen kann, desto besser kann er komplexe Probleme bearbeiten. Systeme, die den Konstrukteur zu frühen Entscheidungen bezüglich der Inklusion, Kohärenz oder Präzision der Information zwingen, erweisen sich den Untersuchungsergebnissen entsprechend offensichtlich als kontraproduktiv. Sie beschneiden die Erfindungsgabe zu einem verfrühten Zeitpunkt im Entwurfsprozess. „Doch was nützt es, dass der Konstrukteur zwar die endgültigen Zeichnungen vom konstruierten Produkt anfertigen kann, nicht aber seine Ideen und Gedanken in den vorausgehenden, kreativen Phasen der Konstruktionsarbeit formulieren und ausarbeiten kann. In diesen Phasen ist eine leichte, aussagefähige Zeichen- und Skizziertechnik von grundlegender Bedeutung für das Endergebnis“ (Tjalve et al., 1975, 41). Da Freihandzeichnungen und Skizzen als wesentliches Hilfsmittel z. B. bei der Lösungsfindung sowie der Kommunikation und Kooperation mit Kollegen, Vorgesetzten und Auftraggebern weiterhin eine bedeutende Rolle spielen werden, besteht dadurch die Gefahr eines Qualifikationsverlusts (Frieling et al., 1990).

Der Impuls zu zeichnen ist im frühen Kindesalter allgemein vorhanden. Würde die Erziehung diesen natürlichen Zeichenimpuls ebenso wie das Lesen und Schreiben weiterentwickeln, wäre das Zeichnen eine Kulturtechnik des Alltags und nicht der Kunst (Prof. Uhlmann im Gespräch, 13.02.2002; vgl. auch McKim, 1972). Da dies nicht der Fall ist, erheben mehrere Autoren die Forderung, Innovationen und Kreativität in der universitären Ausbildung zu fördern. Konventionelle „handwerkliche“ Fertigkeiten, wie das Skizzieren und Zeichnen auf verschiedenen Abstraktionsebenen, sollten von allen entsprechenden Studierenden beherrscht werden und vor allem in den kreativitätsintensiven frühen Entwurfsphasen ohne Einschränkungen Anwendung finden (Hönisch, 1993; vgl. auch Beitz, 1985; Dörner, 1995a). Richter (1983, 1987) beschreibt das Skizzieren als anschauliche Darstellungsart, für die entsprechende Regeln gelten. Das bedeutet, das Skizzieren kann als lehr- und trainierbare Fertigkeit betrachtet werden (vgl. dazu die sieben Problemkreise als solide Bewertungsgrundlage von Zeichnungen nach Uhlmann, a). Skizzierfertigkeiten werden optimalerweise zu „psychisch automatisierten Ausführungsweisen

von Tätigkeitsbestandteilen, ... zu abhängigen Teilen, gleichsam zu Werkzeugen umfassenderer bewusst regulierter Tätigkeiten. Der Ansatzpunkt der bewussten Regulation verlagert sich damit zu umfassenderen Vorannahmen“ (Hacker & Skell, 1993, 73). Psychische Automatisierung beinhaltet die Befähigung, domänenspezifische Aufgaben schnell und mit geringer Gedächtnisbelastung auszuführen (vgl. Bergmann, 1999). Probanden mit hoher Skizzierfertigkeit können die zeichnerische Externalisierung mehrheitlich automatisiert und daher kapazitätsfrei bewältigen. Da die Tätigkeit des Skizzierens interaktiv genutzt wird, um die Komplexität eines Entwurfsproblems zu verringern, dient sie dem Entwerfenden neben einer Entlastung des Gedächtnisses vor allem der Denkunterstützung.

Die entscheidende Bedeutung ausreichender Skizzierfertigkeiten lässt sich vor allem durch die Auswirkungen mangelnder Skizzierfertigkeiten belegen: „Drawing skill is a limiting factor” (Stacey, Eckert & McFadzean, 1999, 925). Die Aufmerksamkeit, die für die Erstellung einer Skizze aufgebracht werden muss, lenkt den Entwerfenden von der Ideenfindung ab. Häufig gehen Ideen, die nicht adäquat in Skizzenform festgehalten werden können, verloren. Zudem ruft eine „schwerfällige“ Skizze gewöhnlich Urteilsprozesse beim Bearbeiter hervor, die den Ideenfluss behindern oder stoppen. „Die kreative Anwendung des Zeichnens ist dadurch gekennzeichnet, dass der Konstrukteur mühelos eine Menge Zeichnungen in einer Technik anfertigt, die die Gedankengänge weder hemmt noch bremst“ (Tjalve et al., 1975, 46).

Diesen Sachverhalten müsste in der Ausbildung durch ein spezielles, systematisches Zeichentraining Rechnung getragen werden (Dylla, 1990; Viebahn, 1993). Als erfolgreich hat sich das Konzept von Uhlmann (Lehrstuhl für Technisches Design der TU Dresden) erwiesen. Hier durchlaufen die Studenten einen viersemestrigen Skizzierkurs, der zunächst die Grundlagen des dreidimensionalen Skizzierens, später eine tiefergehende Beschäftigung damit und den Ausbau der Fertigkeiten umfasst. In Gruppen mit einer Stärke von bis zu 15 Personen werden sieben Problemkreise des Freihandskizzierens behandelt: die Anordnung des Dargestellten auf dem Blatt, die Textur, Beleuchtung, Strichqualität, Motorik, Perspektive sowie die gedankliche Analyse und Synthese als logisch-abstrakte Denkoperationen beim Zeichnen. Diese Problemkreise bieten zugleich Bewertungskriterien für Zeichnungen und dienen als Grundlage für Aufgabenstellungen zum Freihandzeichnen (s. Uhlmann & Schaarschmidt, 1997; Uhlmann, a).

9.4 Beitrag der Ergebnisse zur Gestaltung von Unterstützungsmitteln

Die intensiv genutzte Wechselwirkung von materialisierendem und geistigem Handeln unter der Bedingung „Entwerfen durch Freihandskizzieren“ erlaubt die Schlussfolgerung, dass effektives Design Problem Solving auf den unverzögert arbeitenden Rückkopplungskreis von Sehen, Vorstellen und Zeichnen angewiesen ist.

Ein weiteres Problem beschreiben Schön et al. (1992, 156): „When we think of designing, however, as a conversation with materials conducted in the medium of drawing and crucial dependent on seeing, we are bound to attend to processes that computers are unable – at least presently unable – to reproduce: the perception of figures or gestalts, the appreciation of qualities, the recognition of unintended consequences of moves.” Die Schnittstellengestaltung muss darauf abzielen, eine effektive und genaue Kommunikation zwischen dem Nutzer und der Funktionalität eines rechnerbasierten Systems zu erleichtern. Man geht davon aus, dass eine derartige Effektivität in der Interaktion am besten durch Schnittstellen realisiert wird, die die natürlichen kognitiven Prozesse und Strukturen des Nutzers innerhalb der Grenzen der derzeitigen Technologie soweit wie möglich unterstützen (Neilson & Lee, 1994; vgl. Müller, 1986a, b). Daraus ergibt sich die Forderung nach einer benutzerorientierten und aufgabenzentrierten Gestaltung von Dialogsystemen: „… research should focus on computer environments that enhance the designer`s capacity to capture, store, manipulate, manage and reflect on what he sees“ (Schön et al., 1992, 156). Angemessene Unterstützungsformen in den leistungsbestimmenden frühen Phasen sollten den mentalen Repräsentationen des Bearbeiters und dem damit verbundenen opportunistischen Vorgehen beim konstruktiven Problemlösen angepasst sein. Es ist von entscheidender Bedeutung für die Effektivität und Effizienz des Entwurfsprozesses, dass der Nutzer vor allem in den frühen Phasen das Gefühl hat, an einer Repräsentation und nicht an einem Rechner zu arbeiten. In graphischen Anwendungen ist die Hauptinformation das Bild selbst.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit belegen die eingangs hypothetisch formulierten Anforderungen der Tätigkeit des Entwerfens in den frühen Phasen an den Konstrukteur. Im folgenden werden daraus Forderungen an die Beschaffenheit der Soft- und Hardware geeigneter digitaler Unterstützungssysteme abgeleitet.

- Die Entwurfsdarstellung sollte *frühzeitig*, d. h. bereits zur Aufgabenpräzisierung, Funktionsermittlung und Lösungsprinzipsuche, erzeugbar sein. Da in diesen frühen Entwurfsphasen die vorhandenen Daten in der Regel unvollständig, unsicher oder unkonkret sind, ist es erforderlich, dass das Konstruktionssystem *unspezifische Formen als Input* unterstützt.

• Der Entwerfende sollte die Darstellung *rasch* und in einem *günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis* generieren können. Dies erfordert die Möglichkeit einer sowohl *direkten* als auch *intuitiven Manipulierbarkeit*. Erstere verlangt eine Einheit von Seh- und Handlungsraum. Die intuitive Manipulierbarkeit setzt voraus, dass die Anwendungsanforderungen weder die Informationsverarbeitungskapazität noch die Expertiseebene des Nutzers übersteigen. Sie verlangt systeminterne Funktionalitäten, die eine Geräte- und Programmbedienung ohne Eingewöhnung zulassen. So kommt der taktil-kinästhetischen Vergleichbarkeit der Zeichenoberfläche mit Papier eine entscheidende Bedeutung zu. Um verschiedene Elemente unterschiedlich stark zu betonen, sollten – vergleichbar mit der Nutzung des Bleistifts - durch den Anpressdruck des Stifts verschiedene Strichstärken und zusätzlich eventuell auch Farben wählbar sein.

Eine derart aufwandsarme Eingabemöglichkeit „setzt beim ureigensten und unverzichtbaren Mittel des Designers an: der manuell verfertigten Zeichnung und Skizze. ... Der Ausführungsqualität und Reife einer Darstellung entspricht dabei jeweils ein bestimmter Reifegrad in der Entwurfsauseinandersetzung mit der übernommenen Entwurfsaufgabe“ (Uhlmann et al., 2000, 18).

• Die Auseinandersetzung des Entwerfenden mit dem Entwurf wird durch einen *unproblematischen Wechsel zwischen bildhaften und symbolischen mentalen Repräsentationsformen* gefördert. Als Konsequenz muss beim rechnergestützten Entwerfen jederzeit ein flexibles Wechseln zwischen den Darstellungsebenen, die sich auf bildhafte und auf symbolische Repräsentationsformen beziehen, möglich sein.

• Durch die Systemlogik aktueller CAD-Programme bedingte Unterbrechungen und verzögerte Rückmeldungen führen gerade während der Ideenentwicklung zu einer Störung der mentalen Bearbeitung des Problems und können im schlimmsten Fall dessen Fortgang behindern (vgl. auch Sachse et al., 1999). Es ist eine essentielle Notwendigkeit, dass der Entwerfende *ohne Verzögerungen* auf das Erkennen von Fehlern oder auf spontane Einfälle reagieren kann.

• Um Fehler und Informationsverluste bei der manuellen Übertragung der Skizze in das CAD-System zu vermeiden, wird dessen durchgängige Nutzung angestrebt. Zukünftige Konstruktionssysteme müssen eine *größtmögliche Flexibilität des Handelns beim Skizzieren* erlauben. So darf etwa eine Linie nicht durch den Anfangs- und Endpunkt angegeben werden müssen, sondern die einzelnen Punkte der Linie sollten kontinuierlich durch die Bewegung des Eingabewerkzeugs „Stift“ zu definieren sein. Das erfordert eine *exakte Interpretation der Skizze durch das CAD-System*. Es muss unter übereinander gezeichneten Linien diejenige erkennen, die die

endgültige Kontur und Lage des Elements darstellt. In der Folge muss die skizzierte Geometrie vom CAD-System als *Pixelgraphik* weiterverarbeitet werden können und nicht nur anhand geometrischer Grundelemente (vgl. Pache et al., 2001). Geometrische müssen von kinematischen bzw. funktionellen Festlegungen unterschieden werden können.

• Lippardt (2000, 101) konstatiert, dass „mit Hilfe von Computern bisher nur Strukturen verarbeitet werden können, deren Komplexität und Flexibilität gegenüber der Komplexität und Flexibilität mentaler Strukturen sehr stark eingeschränkt ist." Als Folge dieser Kompatibilitätsdefizite zwischen mentalen und rechnerinternen Modellen ergeben sich Probleme beim Mensch-Rechner-Dialog (s. DIN EN ISO 9241 – 10, 1996). Die *Dialoggestaltung* gilt als wesentliches Gestaltungsfeld einer integrierten und menschengerechten Arbeits- und Technikgestaltung (Martin, Widmer & Lippold, 1986; Hacker, 1997). *Anwenderfreundlichkeit, Beherrschbarkeit, Transparenz des Dialogs* gelten hierbei als grundlegende Forderungen. Die Software muss unmissverständlich aufgebaut sein und Variationsmöglichkeiten für den Nutzer entsprechend dessen Bedürfnissen bieten (Bergmann, 1998). Die Benutzeroberfläche als zentrale Schnittstelle sollte derart gestaltet sein, dass „für den Benutzer ein Optimum an problembezogenem Handlungsvermögen gewährleistet wird" (Abeln, 1995, 52). Dies bedeutet unter anderem geringe Hierarchietiefen im Menüaufbau, die Möglichkeit zur Veränderung des Aufbaus sowie ein wählbares systeminternes Funktionsangebot, das situationsabhängig eingeschränkt werden kann (Abeln, 1995).

• Beim Entwerfen als innovativer und kreativer Tätigkeit werden häufig neue Lösungsvarianten aus bereits existierenden abgeleitet sowie verschiedene Varianten gleichzeitig bearbeitet. Daher sollten die erstellten Skizzen in der Zusammenschau betrachtet werden können, um einen Überblick zu ermöglichen (vgl. Henderson, 1999, 171: „Getting the whole picture"). Um die Mentalkapazität des Entwerfenden beim rechnergestützten Konstruieren nicht unnötig zu belasten und eine rasche Fehlererkennung zu fördern, wäre eine Fenstertechnik denkbar: Durch *Referenzfenster* wird das *parallele Betrachten* sowie das *flexible Switchen* zwischen verschiedenartigen strukturellen Beschreibungen des Inputs mit unterschiedlichem Konkretisierungsgrad ermöglicht (Helbig, 1994; Tegel, 1996; Rückert, 1997).

• Hinsichtlich der Ausführungsbedingungen werden an die Soft- und Hardware von Konstruktionssystemen unterschiedliche *ergonomische Anforderungen* gestellt. Bezüglich der Software müssen einseitige physische und psychische Belastungen sowie ein vom System vorgegebenes

methodisches Vorgehen zugunsten der Entscheidungsfreiheit verhindert werden. Um physische Probleme zu verhindern, sollte die Hardware flexibel eingestellt und verändert werden können.

• Unter Berücksichtigung der zunehmenden globalen Vernetzung wäre es wünschenswert, dass das System ein *gleichzeitiges Zusammenarbeiten mehrerer Konstrukteure verschiedener Standorte an einem Projekt* ermöglicht. Daher sollten kommunikationsförderliche Funktionen wie das problemlose Mailen von Bildschirmdarstellungen vorgesehen werden.

In der Literatur wird häufig betont, dass die optimierte Gestaltung von Unterstützungssystemen auf die aktive Beteiligung der Benutzer am Entwicklungsprozess angewiesen ist, da seitens der Systemdesigner und Softwareentwickler vielfach das Verständnis für die Denk- und Arbeitsweise des Konstrukteurs fehlt (z. B. Streitz, 1990; Volpert, 1994; Butz, 1997).
Ein entscheidender Beitrag zu einem durchgängig rechnergestützten Informationsverarbeitungsprozess von der Produktidee bis zum fertigen Produkt wurde im Designbereich vom Lehrstuhl Technisches Design der TU Dresden geleistet. Bei dem sog. CASFM (Computer-Aided Solid Freeform Modelling)-System handelt es sich um das erste bekannt gewordene Rapid-Prototyping-Verfahren für Freiformflächenobjekte, an dessen Durchlaufende ein erster physischer Körper und ein rechnerinternes Modell für beliebige Weiterbearbeitungszwecke zur Verfügung steht.
Einen weiteren Ansatz vor allem für die Unterstützung der frühen Entwurfsphasen stellt das sog. „Gegenständliche CAD“ (Tangible CAD bzw. TCAD) dar (Sachse & Specker, 1999a, b; Specker, 1999; Wirth & Zanini, 1999). Hier verfügt der Nutzer sowohl über das von ihm verfertigte Modell des zu entwickelnden Objekts als auch über dessen CAD-Daten. Beim Modellaufbau erfolgt ein Wechsel zwischen dem konkreten, realen Modellieren von Hand und dem abstrakten, rechnerinternen Modellieren, wobei entsprechende Änderungen jeweils direkt übertragen werden.

10 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurden erste Schritte in Richtung der Untersuchung neuartiger digitaler Unterstützungsmöglichkeiten der frühen Entwurfsphasen unternommen. Die empirischen Ergebnisse sowie die daraus abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen für Konstruktionssysteme liefern gleichzeitig interessante Denkanstöße für weitere Forschungsfragestellungen. Im folgenden sind einige Aspekte zusammengefasst, die in zukünftigen Untersuchungen Beachtung verdienen:

• Die drei untersuchten Arbeitsmittel sollten in einem nächsten Schritt im Rahmen des vorgestellten Bewertungskonzepts anhand *unterschiedlich komplexer und komplizierter Problemstellungen* verglichen werden. Lassen sich die Ergebnisse hinsichtlich der Variablen des Erlebens sowie der Ergebnis- und Prozessvariablen bei weiteren Entwurfsproblemen mit komplexeren Schwierigkeitsgraden wiederholen?

• Die *Skizzierfertigkeit* wurde nicht als eigene personale Kovariable erfasst, da man davon ausging, dass alle Probanden diese in ausreichendem Maß aufwiesen. Das Skizzieren wird in technischen Studiengängen praktiziert, auch wenn es nicht in jedem Fall im Skizzierkurs erlernt wurde. Welchen Einfluss haben zeichentechnische Fertigkeiten der Probanden auf den Bereich der Ergebnisse, des Erlebens und des Prozesses?
Eine Idee zu deren Erfassung liefert Fricke (1993) mit einer Skala, welche die Kriterien „Flüssigkeit des Skizzierens und Zeichnens“, „Organisation der Zeichnungserstellung“, „Kenntnisse der Zeichenregeln“, „Anspruch an die Darstellungsgüte und tatsächliche Sauberkeit beim Zeichnen“ umfasst. In diesem Zusammenhang empfiehlt sich eine gesonderte intensive Betrachtung der Studierenden des Technischen Designs als Teilgruppe dieser Untersuchung, da diese eine spezielle Ausbildung im Skizzieren durchlaufen haben.

• Die Prozessvariable „Anteile und Abfolgen der Entwurfsschritte“, für die in dieser Arbeit ein Kategorien- und Auswertungsschema entwickelt und anhand eines Extremgruppenvergleichs getestet wurde, bedarf in weiteren Untersuchungen einer genaueren Analyse. So blieb bei der Protokollierung der Entwurfsschritte die Dauer der einzelnen Schrittarten unberücksichtigt. Neben der Erfassung der Häufigkeiten und Abfolgen der einzelnen Schritte wäre diese zur Gewinnung detaillierter Erkenntnisse über den Entwurfsprozess von Interesse.

• Ferner ist die Erhebung weiterer abhängiger Variablen zur exakteren Beschreibung der mit den Arbeitsmitteln produzierten Entwürfe in Erwägung zu ziehen: Langner (1991) z. B. erfasst

die Quantität (= Elementmenge unter Berücksichtigung des Generierungsaufwands) und Vollständigkeit (= Verhältnis der tatsächlichen zur notwendigen Darstellung im Hinblick auf eine eindeutige und umfassende Realisierung der gedanklichen Lösung) des erstellten Entwurfs.

• Neben einer experimentellen Laborstudie, die zu statistisch abgesicherten Ergebnissen führt, liefern eventuell Fallstudien im Sinne der vergleichenden Kasuistik tiefergehende Analyse- und Erklärungsmöglichkeiten der gefundenen Unterschiede (siehe z. B. Dörner, 1998b).

11 Literaturverzeichnis

Abeln, O. (Hrsg.) (1995). *CAD-Referenzmodell.* Stuttgart: B. G. Teubner.

Akin, Ö. & Lin, C. (1996). Design Protocol Data and Novel Design Decisions. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity,* 35–63. Chichester: Wiley.

Anderson, J. R. (1978). Arguments concerning representations for mental imagery. *Psychological Review*, *85 (4)*, 249-277.

Anderson, J. R. (1985). *Cognitive psychology and its implications*. San Francisco, CA: Freeman.

Anderson, J. R. & Bower, G. H. (1973). *Human associative memory*. Washington, D. C.: Winston.

Anderson, J. R. & Helstrup, T. (1993). Visual discovery in the mind and on paper. *Memory and Cognition, 21 (3)*, 283-293.

Anderson, J. R. & Jeffries, R. (1985). Novice LIPS errors. Undedected losses of information from working memory. *Human Computer Interaction*, *22*, 403-423.

Andreasen, M. M. (1994). Modelling – The language of the designer. *Journal of Engineering Design*, *5 (2)*, 103-115.

Andrus, R. R. (1968). Creativity: a function of computers or executives. *Journal of Marketing, 32*, 1-7.

Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory : a proposed system and its control processes. In: K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation: advances in research and theory*, *2*, 89-195. New York: Academic Press.

Auer, P. & von der Weth, R. (1994). Wie klären Konstrukteure ein Problem? – Die Entwicklung von Erfahrung und das Vorgehen bei der Analyse von Konstruktionsaufgaben. *Konstruktion, 46*, 175-180.

Autodesk (1997). *AutoCAD Release 14 Benutzerhandbuch*. Neuchatel.

Bach, K. (1973). Denkvorgänge beim Konstruieren. *Konstruktion*, *25*, 1-5.

Bacon, F. (1962). *Das neue Organon*. Berlin: Springer.

Baddeley, A. D. (1982). *So denkt der Mensch – Unser Gedächtnis und wie es funktioniert*. Droemer Knaur.

Baddeley, A. D. (1989). The uses of working memory. In: P. R. Solomon, G. R. Goethals, C. M. Kelley & B. R. Stephens (Eds.), *Memory: Interdisciplinary approaches*, 107-123. New York: Springer.

Baddeley, A. D. (1990). *Human memory. Theory and practice*. Hillsdale: Erlbaum.

Baddeley, A. D. (1992). *Working memory.* Oxford: Oxford Scientific Publications.

Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In: G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*, 8, 47-89. New York: Academic Press.

Ball, L. J., Evans, J. St. B. T. & Dennis, I. (1994). Cognitive processes in engineering design: a longitudinal study. *Ergonomics*, *37 (11)*, 1753-1786.

Ball, L. J. & Ormerod, T. C. (1995). Structured and opportunistic processing in design: A critical discussion. *International Journal of Human-Computer Studies, 43,* 131-151.

Ballay, J. M. (1987). An experimental view of the design process. In: W. B. Rouse & K. R. Boff (Eds.), *System Design*, 65-82. New York: North-Holland.

Bartl, C. & Dörner, D. (1998). Sprachlos beim Denken – Zum Einfluss von Sprache auf die Problemlöse- und Gedächtnisleistung bei der Bearbeitung eines nicht-sprachlichen Problems. *Sprache & Kognition, 17,* 224-238.

Baykan, C. (1996). Design Strategies. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity.* Chichester: Wiley.

Beitz, L.-E. (1996). Schlüsselqualifikation Kreativität. *Personal – Organisation – Management, Bd. 4.* Hamburg: Steuer- und Wirtschaftsverlag.

Beitz, W. (1984). Entwicklungszwänge für den Konstrukteur. *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 79 (3),* 116-119.

Beitz, W. (1985). Kreativität des Konstrukteurs. *Konstruktion, 37 (10),* 381-386.

Beitz, W. (1992). Berücksichtigung menschbezogener Anforderungen durch methodisches Konstruieren in der Produktentwicklung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 46 (3),* 165-168.

Beitz, W., Birkhofer, H. & Pahl, G. (1992). Konstruktionsmethodik in der Praxis. *Konstruktion, 44*, 391-397.

Bergmann, B. (1994). Zur Lernförderung im Arbeitsprozess aus psychologischer Sicht. In: B. Bermann & P. Richter (Hrsg.), *Die Handlungsregulationstheorie*, 117-135. Göttingen: Hogrefe.

Bergmann, B. (1999). *Training für den Arbeitsprozess*. MTO, Bd. 21. Zürich: vdf.

Bergmann, J. (1998). Positionen der IG Metall zum Einsatz von CAD. In: E. Frieling & H. Klein (Hrsg.), *Rechnerunterstützte Konstruktion*. Bern: Huber.

Bernard, R. (1997). Rapid Prototyping in der Produktion. In: *Seminarberichte iwb, Rapid Prototyping. Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt*. Herbert Utz Verlag Wissenschaft.

Black, A. (1990). Visible planning on paper and on screen: The impact of working medium on decision–making by novice graphic designers. *Behaviour & Information Technology*, *9 (4),* 283-296.

Blessing, L. T. M., Chakrabarti, A. & Wallace, K. M. (1998). An overview of descriptive studies in relation to a general design research methodology. In: E. Frankenberger, P. Badke-Schaub & H. Birkhofer (Eds.), *Designers – The Key to Successful Product Development*, 42-56. London: Springer.

Bock, A. (1955). Die Begriffe "Konstruieren, Entwerfen und Gestalten". *Die Technik*, *10*, 504-505.

Bortz, J. (1989; 1993). Statistik für Sozialwissenschaftler. Berlin: Springer.

Bortz, J. & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation.* Berlin: Springer.

Bortz, J., Lienert, G. A. & Boehnke, K. (1990). *Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik*. Berlin: Springer.

Braczyk, H.-J., Kerst, C. & Seltz, R. (1998). Vorwort. In: H.-J. Braczyk, C. Kerst & R. Selz (Hrsg.), *Kreativität als Chance für den Standort Deutschland*. Berlin: Springer.

Breiing, A. & Flemming, M. (1993). *Theorie und Methoden des Konstruierens*. Berlin: Springer.

Brown, A. L. (1984). Metakognition, Handlungskontrolle, Selbststeuerung und andere, noch geheimnisvollere Mechanismen. In: F. E. Weinert & R. H. Kluwe (Hrsg.), *Metakognition, Motivation und Lernen*, 255-273. Stuttgart: Kohlhammer.

Brown, D. C. & Chandrasekaran, B. (1989). *Design Problem Solving*. London: Pitman.

Bruner, J. S., Over, R. R. & Greenfield, P. M. (1971). *Studien zur kognitiven Entwicklung*. Stuttgart: Klett.

Brunk, L., Collister, G., Swift, C. & Stayton, S. A. (1958). A correlational study of two reasoning problems. *Journal of Experimental Psychology*, *55*, 236-241.

Bruns, F. W. (1993). Zur Rückgewinnung von Sinnlichkeit. *Technische Rundschau*, *29/30*, 14-18.

Bruns, F. W. (1997). Übergänge zwischen realen und virtuellen Lern- und Arbeitsumgebungen zur Instandhaltungsausbildung. In: J.-P. Pahl (Hrsg.), *Lern- und Arbeitsumgebungen zur Instandhaltungsausbildung*. Seelze: Kallmeyer.

Bucciarelli, L. (1994). *Designing Engineers*. Cambridge: MIT Press.

Bühler, K. (1907). I: Tatsachen und Probleme einer Psychologie der Denkvorgänge. *Archiv für Psychologie, 9,* 297-305; II: Über Gedanken, *Archiv für Psychologie, 12,* 1-23.

Bullinger, H.-J. (1994). *Ergonomie-, Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*. Stuttgart: B. G. Teubner.

Burger, H. (1986). *Die allmähliche Verfertigung der Idee beim Schreiben. Frankfurter Poetik-Vorlesung.* Frankfurt: Fischer.

Buss, W. (1989). Heutige Anwendungsmöglichkeiten zur Unterstützung des Entwurfsprozesses. *VDI-Fortschrittberichte, 752.* Düsseldorf: VDI.

Butz, H.-W. (1997). Entwicklungsstand von CAD: Amerikanischer Einfluss ist unverkennbar. *SMM Schweizer Maschinenmarkt, Computereinsatz und Design – Optionen für die Zukunft*, *45/97*, 84-87.

Buur, J. & Andreasen, M. M. (1989). Design models in mechatronic product development. *Design Studies*, *10 (3)*, 155-162.

Cakir, A. E. (1996). Ein Sinn verliert seinen Sinn und findet ihn wieder. Der Tastsinn im Spiegel des Technikwandels. In: Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland GmbH (Hrsg.), *Tasten. Schriftenreihe Forum*, *Bd. 7*, 262-275. Göttingen: Steidl.

Cantor, J. & Engle, R. W. (1993). Working-memory capacity as long-term memory activation: An individual-differences approach. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 19*, 1101-1114.

Card, S. K., Moran, T. P. & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction.* Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Carroll, J. M., Thomas J. C. & Malhotra, A. (1980). Presentation and representation in design problem-solving. *British Journal of Psychology*, *71*, 143-153.

Carroll, J. M., Thomas, J. C., Miller, L. A. & Friedman, H. P. (1980). Aspects of solution structure in design problem solving. *American Journal of Psychology*, *93 (2)*, 269-284.

Chambers, D. & Reisberg, D. (1985). Can mental images be ambiguous? *Journal of Experimental Psychology, 11*, 317-328.

Chan, B. & Finger, S. (1999). The Role of Virtual and Physical Prototyping in Design. In: U. Lindemann, H. Birkhofer, H. Meerkamm & S. Vajna (Eds.), *Proceedings of ICED99/Schriftenreihe WDK 26*, 625-630. München: Technische Universität.

Claparède, E. (1932). Die Entdeckung der Hypothese. In: C. F. Graumann (Hrsg.) (1969), *Denken*. Köln: Kiepenheuer & Witsch.

Cohen, J. (1972, 1992). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* Hillsdale, N. J.: Erlbaum.

Cooper, L. A. (1988). The role of spatial representations in complex problem solving. In: S. Schiffer & S. Steele (Hrsg.), *Cognition and Representation*. Boulder: Westview Press.

Cooper, L. A. (1990). Mental representation of three-dimensional objects in visual problem solving and recognition. *Journal of Experimental Psychology*, *16 (6)*, 1097-1106.

Crosby, A. (1972). *Creativity and performance in industrial organization*. London: Travistock Publications.

Cross, N., **Christiaans, H. & Dorst, K.** (Eds.) (1996a). *Analysing Design Activity*. Chichester: Wiley.

Cross, N., **Christiaans, H. & Dorst, K.** (1996b). Introduction: The Delft Protocol Workshop. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity*. Chichester: Wiley.

Cross, N. & Cross, A. C. (1996). Observations of Teamwork and Social Processes in Design. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity*. Chichester: Wiley.

Cross, N. & Cross, A. C. (1998). Expert designers. In: E. Frankenberger, P. Badke-Schaub & H. Birkhofer (Eds.), *Designers: The Key to Successful Product Development*, 71-84. London: Springer.

Cross, N., Dorst, K. & Roozenburg, N. (1992). *Research in Design Thinking*. Delft: University Press.

Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 19*, 450-466.

Davis, G. A. (1973). *Psychology of problem solving: theory and practice*. New York: Basic Books.

Derisavi-Fard, F., Frieling, E. & Hilbig, I. (1989). Ermittlung der Belastung und Beanspruchung beim computergestützten Konstruieren. *Fortschritt-Berichte VDI, 15.* Düsseldorf: VDI.

DIN 199-3 (1984). Teil 3: Begriffe im Zeichnungs- und Stücklistenwesen. Berlin: Beuth.

DIN 10075-2 (2000). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Berlin: Beuth.

DIN 66 234-8 (1988). Teil 8: Bildschirmarbeitsplätze – Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth.

DIN EN ISO 9241-10 (1996). Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 10: Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth.

DIN EN ISO 10075. Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1 (2000): Allgemeines und Begriffe; Teil 2 (2000): Gestaltungsgrundsätze; Teil 3 (2002): Prinzipien und Anforderungen für die Messung und Erfassung psychischer Arbeitsbelastung. Berlin: Beuth.

Dixon, P. & Just, M. A. (1978). Normalisation of Irrelevant Dimensions in Stimulus Comparisons. *Journal of Experimental Psychology, 4 (1)*, 36-46.

Dörner, D. (1974). *Die kognitive Organisation beim Problemlösen*. Bern: Huber.

Dörner, D. (1976; 1987). *Problemlösen als Informationsverarbeitung.* Stuttgart: Kohlhammer.

Dörner, D. (1982). Kognitive Prozesse und die Organisation des Handelns. In: W. Hacker, W. Vol-

pert & M. von Cranach (Hrsg.), *Kognitive und motivationale Aspekte der Handlung*, 26-37. Bern: Huber.

Dörner, D. (1988). Wissen und Verhaltensregulation: Versuch einer Integration. In: H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie*, 204-279. München: PVU.

Dörner, D. (1989). *Die Logik des Misslingens.* Reinbeck: Rowohlt.

Dörner, D. (1994). Gedächtnis und Konstruieren. In: G. Pahl (Hrsg.), *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren: Ergebnisse des Ladenburger Diskurses vom Mai 1992 bis Oktober 1993*, 150-160. Köln: TÜV Rheinland.

Dörner, D. (1995a). Problemlösen und Gedächtnis. In: D. Dörner & E. van der Meer (Hrsg.), *Das Gedächtnis. Probleme – Trends – Perspektiven*, 295-320. Göttingen: Hogrefe.

Dörner, D. (1995b). Der Bild-Sprache-Zyklus. In: W. Hacker & P. Sachse (Hrsg.), *Bild und Begriff III, Zur Rolle von Anschauung und Abstraktion im konstruktiven Entwurfsprozess. Bericht über das Werkstattgespräch,* 204-213.

Dörner, D. (1998a). Sprache und Denken. *Mannheimer Beiträge zur Wirtschafts- und Organisationspsychologie (Sonderheft), Kolloquium anlässlich der Verabschiedung von Prof. Dr. Theo Herrmann*, 40-58.

Dörner, D. (1998b). Thought and design – research strategies, single-case approach and methods of validation. In: E. Frankenberger, P. Badke-Schaub & H. Birkhofer (Eds.), *Designers – The Key to Successful Product Development*, 3-11. London: Springer.

Dörner, D., Kreuzig, H. W., Reither, F. & Stäudel, T. (1981). Planen, Handeln und Entscheiden in sehr komplexen Realitätsbereichen. In: W. Michaelis (Hrsg.), *Bericht über den 32. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie in Zürich 1980, Bd. 1*, 280-283. Göttingen: Hogrefe.

Dorst, K. & Dijkhuis, J. (1996). Comparing Paradigms for Describing Design Activity. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity.* Chichester: Wiley.

Downtown, A. & Leedham, G. (1991). Human aspects of human-computer interaction. In: A. Downtown (Ed.), *Engineering the Human-Computer-Interface*. London: McGraw-Hill.

Duncker, K. (1935). *Zur Psychologie des produktiven Denkens.* Berlin: Springer.

Dutke, S. (1994). *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens. Kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie.* Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie.

Dwarakanath, S. & Blessing, L. (1996). Ingredients of the Design Process: a Comparison between Group and Individual Work. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity.* Chichester: Wiley.

Dylla, N. (1990). Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. *Konstruktionstechnik München, Bd. 5*. München: Hanser.

Eckert, C. (2001). The Communication Bottleneck in Knitwaer Design: Analysis and Computing Solutions. *Computer Supported Cooperative Work*, 10, 29-74.

Eckert, C., Clarkson, J. & Stacey, M. (2001). Information Flow in Engineering Companies: Problems and Their Causes. In: S. Culley (Ed.), *Proceedings of ICED01, Glasgow.* Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publ.

Eckert, C. & Stacey, M. (2001). Dimensions of Communication in Design. In: S. Culley (Ed.), *Proceedings of ICED01, Glasgow.* Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publ.

Ehrlenspiel, K. (1993). Denkfehler bei der Maschinenkonstruktion. In: S. Strohschneider & R. von der Weth (Hrsg.), *Ja, mach nur einen Plan*, 196-207. Bern: Huber.

Ehrlenspiel, K. (1994). Untersuchung individueller Konstruktionsprozesse. In: G. Pahl (Hrsg.), *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ergebnisse des Ladenburger Diskurses vom Mai 1992 bis Oktober 1993*, 43-57. Köln: TÜV Rheinland.

Ehrlenspiel, K. (1995). *Integrierte Produktentwicklung.* München: Hanser.

Ehrlenspiel, K. (1999). Practicans – how are they designing? …And why? In: U. Lindemann, H. Birkhofer, H. Meerkamm & S. Vajna (Eds.), *Proceedings of ICED99/Schriftenreihe WDK 26*, 721-726. München: Technische Universität.

Ehrlenspiel, K., Bernard, R. & Günther, J. (1995). Unterstützung des Konstruktionsprozesses durch Modelle. In: W. Hacker & P. Sachse (Hrsg.), *Bild und Begriff III, Zur Rolle von Anschauung und Abstraktion im konstruktiven Entwurfsprozess. Bericht über das Werkstattge-*

spräch, 45-59.
Ehrlenspiel, K. & Dylla, N. (1991). Untersuchung des individuellen Vorgehens beim Konstruieren. *Konstruktion*, *43*, 43-51.
Ehrlenspiel, K. & Günther, J. (1995). Wie wird Konstruieren erfolgreich? In: *VDI-Berichte, 1169*, 45-70. Düsseldorf: VDI.
Ehrlenspiel, K. & Rutz, A. (1987). Konstruieren als gedanklicher Prozess. *Konstruktion*, *39 (10)*, 409-414.
Eisentraut, R. (1995). Vorstellungen im Konstruktionsprozess. In: W. Hacker & P. Sachse (Hrsg.), *Bild und Begriff III, Zur Rolle von Anschauung und Abstraktion im konstruktiven Entwurfsprozess. Bericht über das Werkstattgespräch,* 77-92.
Ellis, H. C. & Hunt, R. R. (1993). *Fundamentals of Cognitive Psychology.* Madison: Brown & Beuchmark.
Engeln, H. (1997). Die Hand – Geniestreich der Evolution. *GEO*, 7, 120-138.
Ericsson, A. & Kintsch, W. (1991). Memory in comprehension and problem-solving: A long-term working memory. *Institute of Cognitive Science, Publication 91-13.* Boulder: University of Boulder.
Ericsson, K. A. & Simon H. A. (1993). *Protocol Analysis: Verbal Reports as Data*. Cambridge: MIT Press.
Ertel, M. (1994). Psychosoziale Aspekte. In: Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, *Arbeitsmedizinische Aspekte der modernen Büroarbeit*. Berlin.
Facaoaru, C. (1995). *Kreativität in Wissenschaft und Technik*. Bern: Hans Huber.
Feldhusen, J. (1989). Durchgängige und flexible Rechnerunterstützung in der Konstruktion. *Konstruktion*, 41, 47-56.
Ferguson, E. S. (1993). *Das innere Auge – Von der Kunst des Ingenieurs.* Basel: Birkhäuser.
Finke, R. A. (1989). *Principles of mental imagery.* Cambridge, Mass.: MIT Press.
Fish, J. C. (1994). Why do designers sketch?: visual cognition and computer assisted visualisation. In: R. Trappl (Ed.), *Proceedings of the Twelfh European Meeting on Cybernetics and System Research*, 499-506. World Scientific.
Fish, J. C. & Scrivener, S. A. R. (1990). Amplifying the mind´s eye: sketching and visual cognition. *Leonardo*, *23 (1)*,117-126.
Fitzgerald, T. E. (1992). Psychosocial Aspects of Work-Related Musculosceletal Disability. In: J. C. Quick, L. R. Murphy & J. J. Hurrell (Eds.), *Stress and well-being at work: assessments and interventions for occupational mental health*, 117-133. Washington: American Psychological Association.
Flaherty, E. G. (1974). The thinking aloud technique and problem solving ability. *Journal of Educational Research, 68,* 223-225.
Franzen, U. & Merz, F. (1976). Einfluss des Verbalisierens auf die Leistung bei Intelligenzprüfungen: neue Untersuchungen. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 8,* 117-134.
Fricke, G. (1993). Konstruieren als flexibler Problemlöseprozess – Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren. *Fortschritt-Berichte VDI, 227.* Düsseldorf: VDI.
Fricke, G. (1994). Erfolgreiches individuelles Vorgehen beim Konstruieren. *Konstruktion*, *46*, 183-187.
Frieling, E. & Derisavi-Fard, F. (1990). Ändert die CAD-Technik die Arbeitstätigkeit von Konstrukteuren?. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie, 34 (3)*, 135-148.
Frieling, E. & Hilbig, I. (1990). Informationstechniken in der Konstruktion. In: C. Graf Hoyos & B. Zimolong (Hrsg.), *Ingenieurspsychologie, Enzyklopädie der Psychologie, Bd. D/III/2,* 363-395. Göttingen: Hogrefe.
Frost, R. B. (1994). A suggested taxonomy for engineering design problems. *Journal of Engineering Design*, *5 (4)*, 399-410.
Galperin, P. J. (1966). Die geistige Handlung als Grundlage für die Bildung von Gedanken und Vorstellungen. In: J. Lompscher (Hrsg.), *Probleme der Lerntheorie*. Berlin: Volk und Wissen.
Galperin, P. J. (1967a). Die Entwicklung der Untersuchungen über die Bildung geistiger Operatio-

nen. In: H. Hiebsch, F. Klix & M. Vorwerg (Hrsg.), *Ergebnisse der sowjetischen Psychologie*. Berlin: Akademie-Verlag.

Galperin, P. J. (1967b). Die Psychologie des Denkens und die Lehre von der etappenweisen Ausbildung geistiger Handlungen. In: E. A. Budilowa, E. W. Schorochowa, A. W. Bruschlinski et al. (Hrsg.), *Untersuchungen des Denkens in der sowjetischen Psychologie*. Berlin: Volk und Wissen.

Galton, F. (1907). *Inquiries into the human faculty and its development*. London: dent.

Gebauer, G. (1984). Hand und Gewissheit. In: D. Kamper & C. Wulf (Hrsg.), *Das Schwinden der Sinne*. Frankfurt: Suhrkamp.

Gebhardt, A. (2000). *Rapid Prototyping: Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung*. München: Hanser.

Geiser, G. (1990). *Mensch-Maschine-Kommunikation*. München: Oldenburg.

Gentner, D. & Stevens, A. L. (1983). *Mental models.* Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Gero, J. S. & Mc Neill, T. (1998). An Approach to the Analysis of Design Protocols. *Design Studies, 19 (1)*, 21-61.

Giapoulis, A., Schlüter, A., Ehrlenspiel, K. & Günther, J. (1995). Effizientes Konstruieren durch generierendes und korrigierendes Vorgehen. In: V. Hubka (Hrsg.), *Proceedings of ICED95/Schriftenreihe WDK 23*, 477-483. Zürich: Heurista.

Giese, F. (1928). *Psychologie der Arbeitshand.* Berlin: Urban & Schwarzenberg.

Gittler, B. (1990). *3-D-Würfeltest. Verfahren zur Erfassung des räumlichen Vorstellungsvermögens.* Weinheim: Beltz.

Global Ergonomic Technologies (1998). *Comparison of Postures from Pen and Mouse Use*. Guerneville; s. www.wacom.com

Goel, V. (1995). *Sketches of thought*. Cambridge: MIT Press.

Görner, R. (1968). Vorgestellter und ausgeführter Tätigkeitsvollzug – eine Möglichkeit zum Erfassen von Denkverläufen in Arbeitstätigkeiten. In: W. Hacker, W. Skell & W. Straub (Hrsg.), *Arbeitspsychologie und wissenschaftlich-technische Revolution*, 59-72. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Görner, R. (1974). Untersuchungen zur psychologischen Analyse des Konstruierens. *Unveröffentlichte Dissertation, TU Dresden*.

Görner, R. (1976). Zur Entwicklung räumlicher Vorstellungen als Operieren an internen Repräsentationen. In: W. Hacker (Hrsg.), *Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*, 72-77. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Görner, R. (1994). Zur psychologischen Analyse von Konstrukteurs- und Entwurfstätigkeiten. In: B. Bergmann & P. Richter (Hrsg.), *Die Handlungsregulationstheorie. Von der Praxis einer Theorie*, 233-241. Göttingen: Hogrefe.

Görner, R., Höhne, G. & Müller, C. (1972). Untersuchung zur Ermittlung von Kriterien der Konstruktionstätigkeit aus Tätigkeitsmerkmalen. In: W. Skell (Hrsg.), *Psychologische Analysen von Denkleistungen in der Produktion*, 190-220. Berlin: Volk und Wissen.

Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Design Studies*, *4*, 123-143.

Goldschmidt, G. (1994). On visual design thinking: the vis kids of architecture. *Design Studies*, *15,* 158-174.

Goldschmidt, G. (1996). The Designer as a Team of One. In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity.* Chichester: Wiley.

Goldschmidt, G. (1999). The Backtalk of Self-Generated Sketches. In: J. S. Gero & B. Tversky (Eds.), *Visual and Spacial Reasoning in Design,* 163-184. Sydney: Key Center of Design Computing and Cognition, University of Sydney.

Gollwitzer, P. M. (1991). *Abwägen und Planen. Bewusstseinslagen in verschiedenen Handlungsphasen.* Göttingen: Hogrefe.

Grabowski, H. & Geiger, K. (Hrsg.) (1997). *Neue Wege zur Produktentwicklung.* Stuttgart: Raabe.

Grabowski, H. & Pätzold, B. (1988). Entwurfsunterstützung durch Handskizzeneingabe. *CAD-CAM Report, 5,* 94-100.

Grabowski, H. & Rude, S. (1989). Anforderungen an CAD-Konstrukteure aus der Sicht der Konstruktionsmethodik. *Fortschrittberichte-VDI, 752*, 1-26. Düsseldorf: VDI.

Greve, W. & Wentura, D. (1987). *Wissenschaftliche Beobachtung – Eine Einführung*. Weinheim:

PVU.
Gross, M. D. (1994). Recognizing and interpreting diagrams in design. In: T. Catarci, M. Costablie, S. Levialdi & G. Santucci (Eds.), *Advanced Visual Interfaces `94.* Rome: ACM Press.
Grote, K.-H. (1995). Rapid Prototyping: An effective tool within the engineering design process. In: V. Hubka (Hg.), *Proceedings of ICED95/Schriftenreihe WDK 23*, 718-719. Zürich: Heurista.
Grote, K.-H., Beyer, C., Birke, C. & Tenbusch, A. (1999). Die Einbindung computergestützter Technologien wie Rapid Prototyping und Dreidimensionale Digitalisierung in den systematischen Konstruktionsprozess. In: G. Pahl (Hrsg.), *Gedenkschrift Wolfgang Beitz,* 325-338. Berlin: Springer.
Grundmann, R. & van Maanen, H. (1999). Die neue Ära des Zeichnens – Moderne Software- und Produktentwicklung für graphische Anwendungen am Beispiel des Nemetschek D-Boards. In: N. Streitz, B. Remmers, M. Pietzcker & R. Grundmann (Hrsg.), *Arbeitswelten im Wandel – fit für die Zukunft?*, 80-93. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.
Günther, J. (1998). *Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess. Eine empirische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Konstrukteuren aus der Praxis.* Aachen: Shaker.
Günther, J. & Ehrlenspiel, K. (1998). How do designers from practise design? What can design methodology learn from them? How can design methodology support them? In: H. Birkhofer, P. Badke-Schaub & E. Frankenberger (Eds.), *Designers – The Key to Successful Product Development*. London: Springer.
Guindon, R. (1988). Software design tasks as ill-structured problems, software design as an opportunistic process. *MCC Technical Report, STP-214-88.*
Guindon, R. (1990a). Knowledge exploited by experts during software system design. *International Journal of Man-Machine Studies, 33,* 279-304.
Guindon, R. (1990b). Designing the design process: Exploiting opportunistic thoughts. *Human-Computer Interaction*, *5*, 305-344.
Haasis, S. (1995). *Integrierte CAD-Anwendungen. Rationalisierungspotentiale und zukünftige Einsatzgebiete.* Berlin: Springer.
Hacker, W. (1978*). Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie: Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten.* Bern: Huber.
Hacker, W. (1986). *Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
Hacker, W. (1987). Software-Gestaltung als Arbeitsgestaltung. In: K.-P. Fähnrich (Hrsg.), *Software-Ergonomie `97*, 29-42. München: Oldenbourg.
Hacker, W. (1988). Handlung. In: R. Asanger & G. Wenninger (Hrsg.), *Handwörterbuch der Psychologie*, 275-282. München: PVU.
Hacker, W. (1989). How to feed the computer quickly? Pros and cons of hierarchical data organization. In: F. Klix, N. A. Streitz, Y. Waern & H. Wandtke (Eds.), *Man-Computer-Interaction Research*, 253-271. Amsterdam: North-Holland.
Hacker, W. (1992). Expertenkönnen Erkennen und Vermitteln. *Arbeit und Technik – Praxisorientierte Beiträge aus Psychologie und Informatik, Bd. 2.* Stuttgart: Verlag für Angewandte Psychologie.
Hacker, W. (1994). Zur Struktur von Handlungswissen bei Entwurfstätigkeiten. In: G. Pahl (Hrsg.), *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ergebnisse des Ladenburger Diskurses vom Mai 1992 bis Oktober 1993*, 161-175. Köln: TÜV Rheinland.
Hacker, W. (1995a). Bild und Begriff III – zur Einführung. In: W. Hacker & P. Sachse (Hrsg.), *Bild und Begriff III, Zur Rolle von Anschauung und Abstraktion im konstruktiven Entwurfsprozess. Bericht über das Werkstattgespräch,* 1-5.
Hacker, W. (1995b). Konstruieren als Handeln – Bild : Begriff = Zeichnen : Denken? [Psychologie des Konstruierens]. *Forschungsbericht der TU Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie*, *Bd. 22.*
Hacker, W. (1996a). *Diagnose von Expertenwissen: Von Abzapf- (broaching-) zu Aufbau- ([re-] construction-) Konzepten.* Berlin: Akademie Verlag.
Hacker, W. (1996b). Entwickeln und Konstruieren als Denktätigkeit – zu einer Arbeitswissenschaft

geistiger Erwerbstätigkeit. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, *50 (2)*, 111-116.
Hacker, W. (1997). Improving engineering design – contributions of cognitive ergonomics. *Ergonomics, 40 (10),* 1088-1096.
Hacker, W. (1998a). Psychological Contributions to and Demands on a General Theory of Design. In: H. Grabowski, S. Rude & G. Grein (Eds.), *Universal Design Theory*. Aachen: Shaker Verlag.
Hacker, W. (1998b). *Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten.* Bern: Huber.
Hacker, W. (1999). Konstruktives Entwickeln als Tätigkeit – Versuch einer Reinterpretation des Entwurfsdenkens (design problem solving). *Sprache & Kognition, 18 (3/4),* 88-97.
Hacker, W. & Clauss, G. (1976). Kognitive Operationen, inneres Modell und Leistung bei einer Montagetätigkeit. In: W. Hacker (Hrsg.), *Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten.* Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
Hacker, W., Hübner, I., Müller, H., Nedkowa, S., Osterland, D. & Wollenberger, E. (1992). Profitiert nur der Bessere? Zum Einfluss von Text- und Arbeitsgedächtnismerkmalen. *Sprache & Kognition, 11 (4),* 208-222.
Hacker, W. & Lindemann, U. (2000). Virtual-Reality-Darstellungen – Hilfen beim Entwurfsdenken? *Konstruktion, 54 (5),* 58-64.
Hacker, W. & Matern, B. (1979). Beschaffenheit und Wirkungsweise mentaler Repräsentationen in der Handlungsregulation. *Zeitschrift für Psychologie*, *187*, 141-156.
Hacker, W. & Sachse, P. (1995). Konstruieren als Denktätigkeit. [Psychologie des Konstruierens]. *Forschungsbericht der TU Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie, Bd. 22.*
Hacker, W., Sachse, P. & Schroda, F. (1998). Design thinking – possible ways to sucessful solutions in product development. In: H. Birkhofer, P. Badke-Schaub & E. Frankenberger (Eds.), *Designers – The Key to Succesful Product Development*. London: Springer.
Hacker, W., Sachse, P. & von der Weth, R. (1996). Denkleistungen beim Konstruieren. *VDI-Berichte, Zukunftschance Produktentwicklung*, *1270*, 137-153. Düsseldorf: VDI.
Hacker, W. & Skell, W. (1993). *Lernen in der Arbeit*. Berlin: Bundesinstitut für Berufsbildung.
Haefele, J. W. (1962). *Creativity and Innovation*. London: Chapman Hall.
Hänggi, D. (1989). *Visuelle Vorstellungsfähigkeit.* Bern: Huber.
Hales, C. (1987). Analysis of the Engineering Design Process in an Industrial Context. *Dissertation, Cambridge*.
Hanfer, J. (1957). Influence of verbalisation on problem solving. *Psychological Report*, *3*, 360.
Harris, D. H. (1960). The development and validation of a test of creativity in engineering. *Journal of Applied Psychology, 44,* 254-257.
Hartmann, E. A. & Eberleh, E. (1991). Inkompatibilitäten zwischen mentalen und rechnerinternen Modellen im rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. In: D. Ackermann & E. Ulich (Hrsg.), *Software-Ergonomie `91*. Stuttgart: Teubner.
Hegarty, M. (1991). Knowledge and processes in mechanical problem solving. In: R. J. Sternberg & P. A. French (Eds.), *Complex problem solving: Principles and mechanisms*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
Heinrich, W. (1987). Einflussgrößen auf das schöpferische Arbeiten des Ingenieurs. *Maschinenbautechnik, 36 (12)*, 532-535.
Heinrich, W. (1989). Einführung in das Lösen komplexer Probleme im Konstruktionsprozess. *Maschinenbautechnik*, *38 (3)*, 100-103.
Helbig, D. (1994). Entwicklung produkt- und unternehmensorientierter Konstruktionsleitsysteme. *Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Bd. 30.* Berlin: TU Berlin.
Held, R., **Efstathiou, A. & Green, B.** (1966). Adaption to displaced and delayed visual feedback from the hand. *Journal of Experimental Psychology, 72*, 887-891.
Helm, J. (1965). Zur Bedingungsanalyse des Sprechens bei verzögerter akustischer Rückmeldung. In: *Psychologie als gesellschaftliche Produktivkraft. Bericht über den 1. Kongress der Gesellschaft für Psychologie der DDR.* Berlin: GPsDDR.
Henderson, K. (1991). Flexible Sketch and Inflexible Data Bases. *Science, Technology, and Human Values, 16,* 448-473.

Henderson, K. (1995). The Political Career of a Prototype: Visual Representation in Design Engineering Consensus and Conflict. *Social Problems, 42*, 274-299.
Henderson, K. (1999). *On line and on paper: visual representations, visual culture, and computer graphics in design engineering.* Cambridge: MIT Press.
Herbert, D. (1987). Study Drawings in Architectural Design: Applications for CAD Systems. *Proceedings of the 1987 Workshop of the Association for Computer-Aided Design in Architecture (ACADIA).*
Hesse, F. W. (1982). Effekte des semantischen Kontextes auf die Bearbeitung komplexer Probleme. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie, 29*, 62-91.
Hönisch, G. (1993). Förderung der Kreativität in der universitären Konstruktionsausbildung. *Konstruktion*, *45*, 295-300.
Hubka, V. (1983). Darstellen und Modellieren beim Konstruieren. *Vorbereitungsmaterial für die ICED 83,* 255-269. Zürich: Heurista.
Huberty, C. J. & Morris, J. D. (1989). Multivariate analysis versus multiple univariate analysis. *Psychological Bulletin, 105*, 302-308.
Hwang, T. S. & Ullman, D. (1990). The design capture system: capturing back of the envelope sketches. *Journal of Engineering Design*, *1 (4)*, 339-353.
Jansen, H. & Krause (1984). Interpretation of Freehand Drawings for Mechanical Design Process. *Computer & Graphics, 8 (4)*, 351-369.
Jansen, H. , Nullmeier, E. & Roediger, K.-H. (1985). Handsketching as a Human Factor Aspect in Graphical Interaction. *Computer & Graphics, 9 (3)*, 195-210.
Jansen, H. & Timmermann, M. (1987). Handskizzierter Entwurf von CAD-Modellen mit CASUS. *Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 82 (7),* 398-404.
Jaspers, K. (1983). *Von der Wahrheit.* München: Piper.
Johnson-Laird, P. N. (1980). *Mental models. Towards a cognitive science of language, inference and consciousness.* Cambridge: Cambridge University Press.
Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models.* Cambridge: Harvard University Press.
Kavakli, M., Scrivener, S. A. R. & Ball, L. J. (1998). Structure in idea sketching behaviour. *Design Studies*, *19 (4)*, 485-517.
Kesselring, F. (1951). *Bewertung von Konstruktionen*. Düsseldorf: Deutscher Ingenieur-Verlag.
Kieras, D. E. (1978). Beyond pictures and words. *Psychological Bulletin, 85 (3),* 532-554.
Kintsch, W. & Ericsson, A. (1996). Die kognitive Funktion des Gedächtnisses. In: D. Albert & K. H. Stapf (Hrsg.), *Kognition, Enzyklopädie der Psychologie*, Bd. C/II/4, 541-601. Göttingen: Hogrefe.
Kirby, K. N. & Kosslyn, S. M. (1992). Thinking visually. In: G. W. Humphreys (Ed.), *Understanding vision. An interdisciplinary perpective*, 71-86. Cambridge, Mass.: Blackwell.
Kirkpatrick, D. L. (1959). Techniques for Evaluating Training Problems. *Journal of the American Society of Training Directors,* 3-26.
Kirkpatrick, D. L. (1967). Evaluation of Training. In: R. S. Craig & D. R. Bittel (Eds.), *Training and Development Handbook.* New York: Mc Graw Hill.
Kirkpatrick, D. L. (1976). Evaluation of Training. In: R. S. Craig & D. R. Bittel (Eds.), *Training and Development Handbook.* New York: Mc Graw Hill.
Klauer, K. C. (1993). *Belastung und Entlastung beim Problemlösen. Eine Theorie deklarativen Vereinfachens.* Göttingen: Hogrefe.
Klauer, K. C. (1995). Grundlagen der Problemlöseforschung. In: B. Strauß & M. Kleinmann (Hrsg.), *Computersimulierte Szenarien in der Personalarbeit*, 17-42. Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie.
Kleinbeck, U. (1992). Grundlagenforschung und Anwendung – ein Spannungsfeld zum Nutzen der Psychologie? In: D. Frey, C. Graf Hoyos & D. Stahlberg (Hrsg.), *Angewandte Psychologie - Ein Lehrbuch.* Weinheim: Psychologie Verlags Union.
Klix, F. (1971). *Information und Verhalten.* Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
Klix, F. (1993). *Erwachendes Denken.* Heidelberg: Spektrum.
Klix, F. & Lander, H.-J. (1967). Die Strukturanalyse von Denkprozessen als Mittel der Intelligenzdiagnostik. In: F. Klix, W. D. Gutjahr & J. Mehl (Hrsg.), *Intelligenzdiagnostik*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Klix, F., Neumann, J., Seeber, A. & Sydow, H. (1963). Die algorithmische Beschreibung des Lösungsprinzips einer Denkanforderung. *Zeitschrift für Psychologie, 168.*

Klose, J. & Meerkamm, H. (1994). Perspektiven der Konstruktionsunterstützung durch das CAD-Referenzmodell. In: J. Gausemeier (Hrsg.). *CAD `94, Fachtagung der Gesellschaft für Informatik e. V., Paderborn, 17./18.3.1994*, 333-352. München: Hanser.

Kluwe, R. H. (1988). Methoden der Psychologie zur Gewinnung von Daten über menschliches Wissen. In: H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie*, 359-385. München: Urban & Schwarzenberg.

Kluwe, R. H. (1990). Problemlösen, Entscheiden und Denkfehler. In: C. Graf Hoyos & B. Zimolong (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie, Enzyklopädie der Psychologie*, Bd. D/III/2, 121-147. Göttingen: Hogrefe.

Kluwe, R. H. & Haider, H. (1990). Modelle zur internen Repräsentation komplexer technischer Systeme. *Sprache & Kognition*, *9*, 173-192.

Knoblich, G. & Rhenius, D. (1995). Zur Reaktivität Lauten Denkens beim komplexen Problemlösen. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie, 3*, 419-454.

Knoegen, N. & Sondergeld, K. (1985). *Wissenschaftstheorie für Sozialwissenschaftler: eine problemorientierte Einführung*. Opladen: Leske & Budrich.

Knoop, W. G. (1996). Towards more effective capturing of empirical data from design processes. *Proceedings of 1st Conference in Descrptive Design, Istanbul*.

Kosslyn, S. M. (1980). *Image and mind.* Cambridge: Harvard University Press.

Kosslyn, S. M. (1983). *Ghosts in the mind machine*. New York: Norton.

Kosslyn, S. M., Brunn, J., Cave, K. R. & Wallach, R. W. (1984). Individuell difference in mental imagery ability: A computational analysis. *Cognition*, *18*, 195-243.

Kosslyn, S. M. & Pomerantz, J. R. (1992). Bildliche Vorstellungen, Propositionen und die Form interner Repräsentation. In: D. Münch (Hrsg.), *Kognitionswissenschaft: Grundlagen, Probleme, Perspektiven*, 253-289. Frankfurt: Suhrkamp.

Kranke, G. (1987). Untersuchung zur Urteilsübereinstimmung zwischen einem Objekt in der Realität und ausgewählten Veranschaulichungsmitteln im Design. *Dissertation TU Dresden*.

Krause, W. (1997). Funktionsprinzip Vereinfachung. In: W. Krause, U. Kotkamp & R. Goertz (Hrsg.), *KogWis `97 – Proceedings der 3. Fachtagung der Gesellschaft für Kognitionswissenschaft*. Jena: Friedrich-Schiller-Universität.

Krause, W. (2000). *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht: Vereinfachung, Flexibilität und Invarianz in der menschlichen Informationsverarbeitung.* Göttingen: Hogrefe.

Krause, W., Schack, B., Gibbons, H. & Kriese, B. (1997). Über die Unterscheidbarkeit begrifflicher und bildhaft-anschaulicher Repräsentationen bei elementaren Denkanforderungen. *Zeitschrift für Psychologie, 205 (2),* 169-202.

Krause, W., Seidel, G., Heinrich, F., Sommerfeld, E., Grundlach, W., Ptucha, J., Schack, B. & Goertz, R. (1999). Multimodale Repräsentation als Basiskomponente kreativen Denkens. In: B. Zimmermann & F. Heinrich (Hrsg.), *Kreativität*. Jena: Universitätsverlag Jena.

Krause, W. & Sommerfeld, E. (1984). Neuere Ergebnisse denkpsychologischer Grundlagenforschung unter besonderer Berücksichtigung von Methodologie und Methodik in den Ingenieurwissenschaften. In: J. Müller (Hrsg.), *Probleme schöpferischer Ingenieurarbeit*, 31-70, Manuskriptdruck. TH Karl-Marx-Stadt.

Kuttig, D. (1993). Rechnerunterstützte Funktions- und Wirkstrukturverarbeitung beim Konzipieren. *Bericht Konstruktionstechnik, Bd. 25.* Berlin: TU.

Kyllonen, P. C. & Christal, P. E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working memory capacity?! *Intelligence*, *14*, 389-433.

Landay, J. A. & Myers, B. A. (1995). Interactive Sketching for the Early Stages of User Interface Design. *CHI ´95. Mosaic of Creativity, 7.-11. Mai 1995*, 43-50.

Langley, P. & Jones, R. (1988). Computational Model of scientific insight. In: R. J. Sternberg (Ed.), *The nature of creativity.* Cambridge: University Press.

Langner, T. (1991). Analyse von Einflussfaktoren beim rechnergestützten Konstruieren. *Schriftenreihe Konstruktionstechnik TU Berlin.*

Langner, T., Müller, T. & Springer, J. (1990). Belastungs- und Beanspruchungsanalyse der Kon-

struktionsarbeit. *Konstruktion, 42*, 157-164.
Larkin, J. H. & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, *11 (1)*, 65-100.
Leinert, S., Römer, A. & Sachse, P. (1999). Externe Unterstützung der Problemanalyse bei entwerfenden Tätigkeiten. *Sprache & Kognition*, *18 (1/2)*, 30-38.
Lindemann, U., Bernard, R. & Irlinger, R. (1996). Wege zum optimalen Produkt – ein Beispiel aus dem Maschinenbau. *Bild und Begriff IV*, 51-64.
Linneweh, K. (1991). *Kreatives Denken*. Rheinzabern: Dieter Gitzel.
Lippardt, S. (2000). Gezielte Förderung der Kreativität durch bildliche Produktmodelle. *Fortschritt-Berichte VDI, 325.* Düsseldorf: VDI Verlag.
Liu, J. (1995). *Handskizzeneingabe von Freiformgeometrien für CAD-Modelle*. München: Hanser.
Lloyd, P., Lawson, B. & Scott, P. (1996). Can Concurrent Verbalization Reveal Design Cognition? In: N. Cross, H. Christiaans & K. Dorst (Eds.), *Analysing Design Activity*. Chichester: Wiley.
Logan, B. & Smithers, T. (1993). Creativity and design as exploration. In: J. S. Gero & M. L. Maher (Eds.), *Modelling creativity and knowledge-based creative design*, 139-175. Hillsdale, N. J.: Erlbaum.
Long, J. (1975). Effects of randomly delayed visual and auditory feedback on keying performance. *Ergonomics, 18 (3)*, 337-347.
Luchins, A. S. (1942). Mechanization in problem-solving : The effect of Einstellung. *Psychological Monographs, 54, 6*.
Lüer, G. & Spada, H. (1990). Denken und Problemlösen. In: H. Spada (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie*, 189-280. Bern: Huber.
Maier, N. R. F. (1933). An aspect of human reasoning. British Journal of Psychology, 24, 144-154.
Maier, P. H. (1999). *Räumliches Vorstellungsvermögen*. Donauwörth: Auer Verlag.
Marti, K. (1986). Flexible Fertigung – wohin? *Management- Zeitschrift*, *55 (1)*, 34-36.
Martin, P., Widmer, H.-J. & Lippold, M. (1986). *Ergonomische Gestaltung der Hard- und Software von CAD-Systemen.* Kassel: Gebrüder Grimm.
Matern, B. (1976). Mentale Repräsentationen in funktionellen Beziehungen: Beschaffenheit, Entstehung und Funktion. *Dissertation B, TU Dresden*.
Meßner, G. (1987). *Kreativitätsförderung im Rahmen betrieblicher Innovation*. Frankfurt a. M.: Lang.
McKim, R. H. (1972). *Experiences in visual thinking*. Belmont: Wadsworth.
Miller, F. (2000). Virtuelle Zukunfts-Werkstatt. *Fraunhofer Magazin*, *3*, 6-11.
Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review, 63*, 81-97.
Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K. H. (1973). *Strategien des Handelns. Pläne und Strukturen des Verhaltens.* Stuttgart: Klett.
Minneman, S. L. (1991). The social construction of a technical reality: empirical studies of group engineering design practice. *Dissertation, Stanford University, Xerox Cooperation, Palo Alto Research Center, CA.*
Moore, A. D. (1969). *Invention, discovery and creativity*. New York: Garden City, Doubleday.
Müller, J. (1986a). Konstrukteure und Psychologen müssen heute enger zusammenarbeiten. *Feingerätetechnik, Berlin 35*, 463-465.
Müller, J. (1986b). Methodisch-psychologische Probleme kreativer Tätigkeit an rechnerunterstützten Arbeitsplätzen im modernen Konstruktionsbüro. *Maschinenbautechnik, 35 (5),* 224-227.
Müller, J. (1990). *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Systematik, Heuristik, Kreativität.* Berlin: Springer.
Müller, T. & Luczak, H. (1988). Vergleichende Belastungs- und Beanspruchungsanalyse konventioneller und rechnerunterstützter Konstruktionsarbeit – Methodenentwicklung und Laborerprobung. In: E. Frieling & H. Klein (Hrsg.). *Rechnerunterstützte Konstruktion*. Bern: Huber.
Müller, J., Praß, P. & Beitz, W. (1992). Modelle beim Konstruieren. *Konstruktion*, *44*, 319-324.
Muthig, K. P. & Schönpflug, W. (1981). Externe Speicher und rekonstruktives Verhalten. In: W. Michaelis (Hrsg.), *Bericht über den Kongress der DGfP 1980 in Zürich*, Bd. 1, 225-229. Göttingen: Hogrefe.

Neilson, I. & Lee, J. (1994). Conversations with graphics: implications for the design of natural language/graphics interfaces. *Int. J. Human-Computer Studies, 40,* 509-541.
Newell, A., Shaw, J. C. & Simon, H. A. (1962). The Process of Creative Thinking. In: H. E. Gruber (Ed.), *Contemporary Approaches to Creative Thinking*, 63-119. New York.
Newell, A. & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving.* Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall.
Nisbett, R. E. & Wilson, T. D. (1977). Telling more than we can know: Verbal Reports on Mental Processes. *Psychological Review, 84*, 231-259.
Norman, D. A. (1986). New views of information processing: implications for intelligent decision support systems. In: E. Hollnagel, G. Mancini & D. D. Woods (Eds.), *Intelligent decision support in process environments*, 123-136. Berlin: Springer.
Norman, D. A. (1989). Cognitive Artifacts. In: J. M. Carroll (Ed.), *Designing Interaction: Psychology at the Human-Computer-Interface,* 17-38. New York: University of Cambridge Press.
Offner, J. D. (1967). Energizing the creative potential future engineer. *Journal of Creative Behavior, 1*, 15-21.
Owens, W. A. (1969). Cognitive, noncognitive and environmental correlates of mechanical ingenuity. *Journal of Applied Psychology, 53*, 199-209.
Pache, M., Lindemann, U., Römer, A. & Hacker, W. (2001). Skizzieren mit dem CAD-System? CAD-CAM Report, 3, 98-103.
Pache, M., Weißhahn, G., Römer, A., Lindemann, U. & Hacker, W. (1999). Effort-Saving Modeling in Early Stages of the Design Process. In: U. Lindemann, H. Birkhofer, H. Meerkamm & S. Vajna (Eds.), *Proceedings of ICED99/Schriftenreihe WDK 26*, *2*, 679-684. München: Technische Universität.
Pahl, G. (1990). *Konstruieren mit 3D-CAD*. Berlin: Springer.
Pahl, G. (1994). Merkmale guter Problemlöser beim Konstruieren. In: G. Pahl (Hrsg.), *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren: Ergebnisse des Ladenburger Diskurses von Mai 1992 bis Oktober 1993*, 58-67. Köln: TÜV Rheinland.
Pahl, G. & Beitz, W. (1993; 4. Auflage 1997). *Konstruktionslehre*. Berlin: Springer.
Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*, *76*, 241-263.
Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes.* New York: Holt.
Paivio, A. (1986). *Mental representation – a dual coding approach.* New York: Oxford University Press.
Pearson, D., Logie, R. H. & Green, C. (1996). Mental manipulation, visual working memory and executive processes. *Psychologische Beiträge*, *38*, 324-342.
Pfitzmann, J. & Jin, Z. (1992). Benutzungsorientierte Dialoggestaltung für die CAD-Anwendung. In: *VDI-Berichte, 993,* 133-148. Düsseldorf: VDI.
Piaget, J. (1969). *Das Erwachen der Intelligenz beim Kinde.* Stuttgart: Klett.
Plath, H.-E. & Richter, P. (1984). *Ermüdung – Monotonie – Sättigung – Stress. BMS-Handanweisung*. Berlin: Psychodiagnostisches Zentrum.
Preece, J. (1999). *Human-computer interaction*. Harlow: Addison-Wesley.
Purcell, A.T. (1998). Editorial. *Design Studies, 19 (4)*, 385-387.
Purcell, A. T. & Gero, J. S. (1998). Drawings and the design process. *Design Studies*, *19 (4)*, 389-430.
Putz-Osterloh, W. & Schroiff, M. (1987). Komplexe Verhaltensmaße zur Erfassung von Hochbegabung. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie, 8*, 207-216.
Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, *80*, 1-24.
Radcliffe, D. F. (1998). Event scales and social dimensions in design practice. In: H. Birkhofer, P. Badke-Schaub & E. Frankenberger (Eds.), *Designers – The Key to Successful Product Development,* 217-232. London: Springer.
Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction. An Approach to Cognitive Engineering*. New York: North-Holland.
Reason, J. (1986). Recurrent errors in process environments: some implications for the design or intelligent decision support systems. In: E. Hollnagel, G. Mancini & D. D. Woods (Eds.), *In-*

telligent decision support in process environments, 255-270. Berlin: Springer.
Reason, J. (1987). The psychology of mistakes: a brief review of planning failures. In: J. Rasmussen, K. Duncan & J. Leplat (Eds.), *New technology and human error*, 45-52. Chichester: Wiley.
Rehkämper, K. (1993). Picture yourself in a boat on a river – Über die Bildhaftigkeit mentaler Repräsentationen. *Kognitionswissenschaft, 3*, 117-126.
Reinsch, E. (1997). Untersuchung der Möglichkeiten zur rechnerunterstützten Verwendung von Handskizzen im Konstruktionsprozess. *Unveröffentlichte Arbeit, IKMF*. Braunschweig. TU.
Reitman, W. R. (1964). Heuristic decision procedures, open constraints, and the structure of ill-defined problems. In: M. W. Shelly & G. L. Bryan (Eds.), *Human Judgement and Optimality*. New York: Wiley.
Reitman, W. R. (1965). *Cognition and thought.* New York: Wiley.
Richter, G. (o. J.). Psychische Belastung und Beanspruchung. *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.* Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft.
Richter, W. (1983). Skizzieren als anschauliche Darstellungsart. *Konstruktion*, *35 (10)*, 391-396.
Richter, W. (1987). Gestalten nach dem Skizzierverfahren. *Konstruktion*, *39 (6)*, 227-237.
Riemer, S. (1996). Prototyping als Unterstützungsmöglichkeit des Problemlösens im konstruktiven Entwurfsprozess. *Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Berlin*.
Riemer, S., Weißhahn, G. & Hacker, W. (1999). Zur Organisation der Entwurfstätigkeit: Opportunistisches Vorgehen mit geplanten Episoden. *Forschungsbericht der TU Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie, Bd. 68.*
Rittel, H. W. & Musso, A. (1992). Über das Messen der Güte von Gebäuden. In: H. W. Rittel (Hrsg.), *Planen, Entwerfen, Design: Ausgewählte Schriften zu Theorie und Methodik*, 93-103. Stuttgart: Kohlhammer.
Rittel, H. W. & Webber, M. W. (1984). Planning problems are wicked problems. In: N. Cross (Ed.), *Developments in Design Methodology.* Chichester: Wiley.
Roadstrum, W. (1967). *Excellence in Engineering*. New York: Wiley.
Römer, A. (2002). Unterstützung des Design Problem Solving: Einsatz und Nutzen einfacher externer Hilfsmittel in den frühen Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses. *Dissertation, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, TU Dresden.* http://hsss.slub-dresden.de/hsss/servlet/hsss.urlmapping.MappingServlet?id=1023713239343-4873
Römer, A., Weißhahn, G. Hacker, W. & Pache, M. (2001). Aufwandsarmes Modellieren im Konstruktionsprozess – Ergebnisse einer Fragebogenstudie. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, *45 (3),* 113-123.
Rössler, A. & Blach, R. (1998). Kreativitätsunterstützung durch Erfahrung in virtuellen Umgebungen. In: H.-J. Braczyk, C. Kerst & R. Seltz (Hrsg.), *Kreativität als Chance für den Standort Deutschland,* 175-181. Berlin: Springer.
Roller, D. (1995). *CAD – Effiziente Anpassungs- und Variantenkonstruktion*. Berlin: Springer.
Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 38 (10 NF)*, 193-200.
Rossman, J. (1964). *Industrial Creativity.* New Hyde Park: New York University Book.
Rouse, W. B. (1983). Models of Human Problem Solving: Detection, Diagnosis and Compensation for System Failures. *Automatica 19 (6),* 613-625.
Rouse, W. B. & Morris, N. M. (1986). On looking into the black box: prospects and limits in the search for mental models. *Psychology Bulletin*, *100 (3)*, 349-363.
Rowe, P. G. (1987). Procedural aspects of design thinking. In: P. G. Rowe, *Design thinking*, 39-218. Cambridge: MIT Press.
Rubinstein, S. L. (1958). *Grundlagen der Allgemeinen Psychologie*. Berlin: Volk und Wissen.
Rubinstein, S. L. (1961). *Das Denken und die Wege seiner Erforschung*. Berlin: Akademie-Verlag.
Rückert, C. (1997). Untersuchungen zur Konstruktionsmethodik – Ausbildung und Anwendung. *Fortschritt-Berichte VDI*, *293*. Düsseldorf: VDI.
Rutz, A. (1985). Konstruieren als gedanklicher Prozess. *Unveröffentlichte Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, TU München*.
Sachse, P. (1999). Unterstützung des entwerfenden Problemlösens im Konstruktionsprozess durch Prototyping. In: P. Sachse & A. Specker (Hrsg.), *Design thinking: Analyse und Unterstützung*

konstruktive Entwurfstätigkeiten, *Mensch-Technik-Organisation, Bd. 22*, 67-145. Zürich: vdf.

Sachse, P. (2001). Idea materialis: Entwurfsdenken und Darstellungshandeln oder über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Skizzieren und Modellieren. *Habilitationsschrift, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, TU Dresden.*

Sachse, P. & Hacker, W. (1995). Early low-cost prototyping – Zur Funktion von Modellen im konstruktiven Entwicklungsprozess. *Forschungsbericht der TU Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie*, *Bd. 19.*

Sachse, P. & Hacker, W. (1997). Unterstützung des Denkens und Handelns beim Konstruieren durch Prototyping. *Konstruktion*, *49 (4)*, 12-16.

Sachse, P., Hacker, W., Leinert, S. & Riemer, S. (1999). Prototyping als Unterstützungsmöglichkeit des Denkens und Handelns beim Konstruieren. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, *2*, 71-82.

Sachse, P. & Leinert, S. (1996). Early prototyping II. Ansatz zu einer Modelltaxonomie. *Forschungsbericht der TU Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie, Bd. 37.*

Sachse, P. & Leinert, S. (1999). Early Rapid Prototyping. In: E. Ulich (Hrsg.), *Optimierung der Produkt- und Prozessentwicklung*, 119-134. Zürich: vdf.

Sachse, P. Leinert, S. & Hacker, W. (2001a). Unterstützung des Entwurfsdenkens. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft,* 1, 24-31.

Sachse, P. Leinert, S. & Hacker, W. (2001b). Designing with computer and sketches. *Swiss Journal of Psychology, 60 (2),* 65-72.

Sachse, P., Leinert, S., Sundin, M. & Hacker, W. (1999). Funktionen des Prototyping im Konstruktionsprozess. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, *4*, 225-236.

Sachse, P. & Specker, A. (1999a). *Design thinking: Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten, Mensch-Technik-Organisation, Bd. 22*. Zürich: vdf.

Sachse, P. & Specker, A. (1999b). Design thinking: Analysis and support of design activities. In: U. Lindemann, H. Birkhofer, H. Meerkamm & S. Vajna (Eds.), *Proceedings of ICED99/Schriftenreihe WDK 26*, *2*, 941-946. München: Technische Universität.

Sauter, S. L., Gotlieb, M. S., Roher, K. M. & Dodson, V. N. (1983). *The Well-Being of Video Display Terminal Users.* Cincinnati: National Institut for Occupational Safety and Health.

Schlicksupp, H. (1998). *Ideenfindung*. Würzburg: Vogel.

Schmid, H. (1995). *Computer und Gesundheit – Gesundheitspsychologische Betrachtung von Beschwerden bei Computerarbeit.* Münster: Waxmann.

Schön, D. A. (1992). Designing as reflective conversation with the materials of a design situation. *Research in Engineering Design*, *3*, 131-148.

Schön, D. A. & Wiggins, G. (1992). Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies*, *13 (2)*, 135-156.

Schönpflug, W. (1986). The trade-off between internal and external storage. *Journal of Memory and Language*, *25*, 657-675.

Schönpflug, W. (1993). Neue Technik und alter Mensch – kulturhistorische Wurzeln einiger Schwierigkeiten mit dem Computer. In: S. Maaß & H. Oberquelle (Hrsg.). *Software-Ergonomie `93: Aufgabenorientierte Systemgestaltung und Funktionalität,* 17-35. Stuttgart: B. G. Teubner.

Schroda, F. (1999). Die Analyse der Anforderungsstruktur konstruktiv-schöpferischer Probleme. In: P. Sachse & A. Specker (Hrsg.), *Design thinking: Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten*, *Mensch-Technik-Organisation, Bd. 22*, 7-65. Zürich: vdf.

Schroda, F. (2000). "Über das Ende wird am Anfang entschieden" – Zur Analyse der Anforderungen von Konstruktionsaufträgen. *Dissertation, TU Dresden/TU Berlin*. http://edocs.tu-berlin.de/diss/2000schroda-frauke.htm.

Schroda, F. & Hacker, W. (1998). "Über das Ende wird am Anfang entschieden" – Die Analyse der Anforderungsstruktur schöpferischer konstruktiver Arbeitsaufgaben. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, *52 (3)*, 162-168.

Schroda, F., Leinert, S. & Sachse, P. (1996). Anforderungsstruktur (task structure) und Problemraum (problem space) – theoretische und empirische Problemanalyse. *Forschungsbericht der TU Dresden, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie*, *Bd. 31.*

Schütze, M. (2000). Unterstützungspotential des Skizzierens und Modellierens als Prozess beim Konstruieren. *Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden.*

Schütze, M., Sachse, P. & Römer, A. (2001). Unterstützungspotential des Skizzierens im Entwurfsprozess. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 4, 249-259.

Schütze, M., Sachse, P. & Römer, A. (2003). Support value of sketching in the design process. *Research in Engineering Design, 14,* 89-97.

Shiffrin, R. M. (1975). Short-term store. The basis for a memory system. In: F. Restle et al. (Eds.). *Cognitive theory, 1,* 193-218. Hillsdale: Erlbaum.

Shiffrin, R. M. & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review, 84*, 127-190.

Simon, H. A. (1973). The structure of ill-structured problems. *Artificial Intelligence, 4,* 181-201.

Simon, H. A. (1990). Invariants of human behavior. *Annual Review of Psychology*, *41*, 1-19.

Skell, W. (Hrsg.) (1972). *Denkleistungen in der Produktion.* Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Smith, G. F. & Browne, G. J. (1993). Conceptual foundations of design problem solving. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, *23 (5)*, 1209-1219.

Smith, M. J. (1984). Health issues in VDT work. In: J. Bennet (Ed.), *Visual Display Terminals, Usability Issues and Health Concerns*, 193-228. New Jersey: Prentice Hall.

Smith, M. J., Cohen, B. G. F. Stammerjohn, L. W. & Happ, A. (1981). An investigation of health complaints and job stress in video display operations. *Human Factors, 23*, 387-400.

Smith, W. M., Crary, J. W. & Smith, K. U. (1960). Delayed visual feedback and behavior. *Science, 132.*

Sommerfeld, E., Krause, W. & Schleußner, C. (1995). Zur Messung des kognitiven Aufwands im Konstruktionsprozess. In: W. Hacker & P. Sachse (Hrsg.), *Bild und Begriff III, Zur Rolle von Anschauung und Abstraktion im konstruktiven Entwurfsprozess. Bericht über das Werkstattgespräch,* 131-167.

Sonnentag, S. (1996). Experten in der Softwareentwicklung: Untersuchung hervorragender Leistungen im Kontext intellektueller Teamarbeit. *Habilitationsschrift, Fachbereich Psychologie, Justus-Liebig-Universität Gießen*.

Specker, A. (1999). Gegenständliches CAD. In: P. Sachse & A. Specker (Hrsg.), *Design thinking: Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten*, *Mensch-Technik-Organisation, Bd. 22*, 147-196. Zürich: vdf.

Spies, K. & Hesse, F. W. (1987). Problemlösen. In: G. Lüer (Hrsg.), *Allgemeine Experimentelle Psychologie.* Stuttgart: Fischer.

Stacey, M. & Eckert, C. (2000). Against Ambiguity. *COOP2000 Workshop Proceedings: The Role of Objects in Design Collaboration: Communicating through Physical and Virtual Objects.* Sophia Antipolis, France: INRIA.

Stacey, M., Eckert, C. & McFadzean, J. (1999). Sketch Interpretation in Design Communication. In: U. Lindemann, H. Birkhofer, H. Meerkamm & S. Vajna (Eds.), *Proceedings of ICED99/Schriftenreihe WDK 26*, Bd. 2, 923-928. München: Technische Universität.

Stachowiak, H. (1965). Gedanken zu einer allgemeinen Theorie der Modelle. *Studium Generale*, *18 (7)*, 432-463.

Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.

Stadler, M., Seeger, F. & Raeithel, A. (1977). *Psychologie der Wahrnehmung*. München: Juventa.

Stauffer, L. A. & Ullman, D. G. (1988). A comparison of the results of empirical studies into the mechanical design process. *Design Studies*, *9 (2)*, 107-114.

Steger, W. (1998). Integration von Berechnungsmethoden in rechnerunterstützte Konstruktionssysteme. *Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, TU Dresden*.

Steiner, G. (1988). Analoge Repräsentationen. In: H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie*, 99-119. München: Psychologie Verlags Union.

Steger, W. & Geiger, M. (1994). Schnelle Wege zu innovativen Produkten. *VDI-Z*, *136 (4)*, 38-45.

Streitz, N. A. (1990). Psychologische Aspekte der Mensch-Computer-Interaktion. In: C. Graf Hoyos & B. Zimolong (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie, Enzyklopädie der Psychologie*, Bd. D/III/2, 241-280. Göttingen: Hogrefe.

Stufflebeam, D. L. (1972). Evaluation als Entscheidungshilfe. In: C. Wulf (Hrsg.), *Evaluation.*

Beschreibung und Bewertung von Unterricht, Curricula und Schulversuchen, 113-145. München: Piper.

Suwa, M., Gero, J. S. & Purcell, T. (1999). Unexpected discoveries: How designers discover hidden features in sketches. In: J. S. Gero & B. Tversky (Eds.), *Visual and Spatial Reasoning in Design, Key Centre of Design Computing and Cognition,* 145-162. Sydney: University of Sydney.

Suwa, M., Purcell, T. & Gero, J. S. (1998). Macroseptic analysis of design processes based on a scheme for coding designers` cognitive actions. *Design Studies, 19 (4)*, 455-483.

Suwa, M., Tversky, B., Gero, J. S. & Purcell, T. (2001). Seeing into sketches: Regrouping parts encourages new interprtations. In: J. S. Gero, B. Tversky & T. Purcell (Eds.), *Visual and Spatial Reasoning in Design II, Key Centre of Design Computing and Cognition,* 207-217. Sydney: University of Sydney.

Sydow, H. (1972). Zur Klassifikation von Problemen und Lösungsprozeduren. In: F. Klix, W. Krause & H. Sydow (Hrsg.), *Analyse und Synthese von Problemlösungsprozessen*, 11-27. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Tang, H.-H. & Gero, J. S. (2001). Sketches as affordances of meanings in the design process. In: J. S. Gero, B. Tversky & T. Purcell (Eds.), *Visual and Spatial Reasoning in Design II, Key Centre of Design Computing and Cognition,* 271-281. Sydney: University of Sydney.

Taylor, S. E. (1980). The availability bias in social perception and interaction. In: D. Kahnemann, P. Slovic & A. Tversky (Eds.), *Judgement under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge: University Press.

Tegel, O. (1996). Methodische Unterstützung beim Aufbau von Produktentwicklungsprozessen. *Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Bd. 35*. Berlin: TU Berlin.

Thomas, J. C. & Carroll, J. M. (1979). The psychological study of design. *Design Studies*, *1*, 5-11.

Thorn, R. P. (1979). Problem-solving for innovation in industry. *Journal of Creative Behavior, 13,* 151-168.

Tjalve, E. & Andreasen, M. M. (1975). Zeichnen als Konstruktionswerkzeug. *Konstruktion*, *27*, 41-47.

Tovey, M. (1986). Thinking styles and modelling systems. *Design Studies*, *7 (1)*, 20-30.

Tovey, M. (1992). Intuitive and objective processes in automotive design. *Design Studies, 13*, 23-43.

Tversky, A. & Kahnemann, D. (1973). Availability: A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive Psychology, 5*, 207-232.

Ueckert, H. (1989). Denken als Probehandeln. Zur Untersuchung komplexen Problemlösens an Simulationsmodellen. In: W. Schönpflug (Hrsg.), *Bericht über den 36. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie in Berlin 1988.* Göttingen: Hogrefe.

Ueckert, H. (1995). Planung, Organisation und Kontrolle. In: W. Sarges (Hrsg.), *Management-Diagnostik*, 254-263. Göttingen: Hogrefe.

Uhlmann, J. (1995). *Design für Ingenieure.* TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen.

Uhlmann, J. (2000). *Design für Ingenieure*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen.

Uhlmann, J. (a) *7 Problemkreise des Freihandzeichnens – Vorlesungsunterlagen*. TU Dresden: unveröffentlicht.

Uhlmann, J. & Feuchtenberger, U. (2000). Das UL-I Projekt: Innovatives Design eines Ultraleichtflugzeuges mit ICEM Surf. *Vortrag auf dem ICEM Surf Usermeeting 2000, Paris 9./10. Oktober 2000.*

Uhlmann, J. & Richter, P. (1994). Aufbau und Funktion subjektinterner Geometriemodelle (SIG) bei der CAD/CAM-Arbeit. Computergestütztes Entwerfen von physischen Freiformflächen im technischen Design (CASFM) und dessen Integration in den konstruktiven Entwurfsprozess. *BMBF-Antrag*. TU Dresden: unveröffentlicht.

Uhlmann, J. & Schaarschmidt, K.-H. (1997). *Technisches Design – Eine Ausbildungs- und Arbeitsrichtung an der TU Dresden.* Dresden: Technische Universität.

Ulich, E. (1998). *Arbeitspsychologie.* Zürich/Stuttgart: vdf/Schäffer-Poeschel.

Ullman, D. G. (1997). *The Mechanical Design Process.* McGraw-Hill.

Ullman, D. G., Wood, S. & Craig D. (1990). The importance of drawing in the mechanical design process. *Computer & Graphics*, *14 (2)*, 263-274.
Vajna, S. (1991). Nutzung des Rationalisierungspotentials in Entwicklung, Konstruktion und Arbeitsvorbereitung. *CAD-CAM Report*, *10*, 170-183.
Vajna, S., **Weber, C., Schlingensiepen, J. & Schlottmann, T.** (1994). *CAD/CAM für Ingenieure: Hardware, Software, Strategien.* Wiesbaden: Vieweg.
VDI Richtlinien 2221 (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.* Düsseldorf: VDI.
VDI Richtlinien 2225 (1997). *Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren.* Düsseldorf: VDI.
VDI Richtlinien 2244 (1988). *Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse.* Düsseldorf: VDI.
Verstijnen, I. M. & Hennessey, J. M. (1998). Sketching and creative discovery. *Design Studies, 19 (4)*, 519-546.
Viebahn, U. (1993; 2. Auflage 1996). *Technisches Freihandzeichnen*. Berlin: Springer.
Viebahn, U. (1995). Technisch zeichnen kann jeder. *DIE ZEIT, Nr. 14*, 31.3.1995, 530.
Vincenti, W. G. (1990). *What Engineers Know and How They Know It.* Baltimore: John Hopkins University Press.
Visser, W. (1990). More or less following a plan during design: opportunistic deviations in specification. *International Journal of Man-Machine Studies, 33,* 247-278.
Visser, W. (1994). Organisation of design activities: opportunistic, with hierarchical episodes. *Interacting with Computers*, *6 (3)*, 239-274.
Volpert, W. (1969). Untersuchungen über den Einsatz des mentalen Trainings beim Erwerb einer sensumotorischen Fertigkeit. *Dissertation an der Deutschen Sporthochschule Köln*.
Volpert, W. (1983). Das Modell der hierarchisch-sequentiellen Handlungsorganisation. In: W. Hacker, W. Volpert & M. von Cranach (Hrsg.), *Kognitive und motivationale Aspekte der Handlung,* 38-57. Bern: Huber.
Volpert, W. (1987). Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. In: U. Kleinbeck & J. Rutenfranz (Hrsg.), *Arbeitspsychologie, Enzyklopädie der Psychologie,* Bd. D/III/1, 1-42. Göttingen: Hogrefe.
Volpert, W. (1988). *Zauberlehrlinge – Die gefährliche Liebe zum Computer*. München: dtv.
Volpert, W. (1994). Von der Software-Ergonomie zur Arbeitsinformatik. In: W. Volpert (Hrsg.), *Humanwissenschaft der Arbeit – ein Rückblick.* Berlin: TU.
von der Weth, R. (1988). Konstruktionstätigkeit und Problemlösen. In: E. Frieling & H. Klein (Hrsg.), *Rechnerunterstützte Konstruktion.* Bern: Huber.
von der Weth, R. (1994). Konstruieren: Heuristische Kompetenz, Erfahrung und individuelles Vorgehen. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie , 38 (3)*, 102-111.
von der Weth, R. (2001). *Management der Komplexität – Ressourcenorientiertes Handeln in der Praxis*. Bern: Huber.
von Humboldt, W. (1988). *Werke III. Schriften zur Sprachphilosophie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
von Kleist, H. (1987). Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Reden. In H. Sembdner (Hrsg.), *Sämtliche Werke und Briefe*, *Bd. 2*, 319-324. München: DTV.
Wallace, K. (1997). Productdevelopment and Design Research. *Proceedings of ICED97, Ergänzung der Tagungsbände,* 1-6. Zürich: Heurista.
Ward, T. B., Finke, R. A. & Smith, S. M. (1995). *Creativity and the Mind: Discovering the Genius Within.* New York: Plenum Press.
Ward, T. B., Smith, S. M. & Finke, R. A. (1999). Creative Cognition. In: R. Sternberg (Ed.), *Handbook of Creativity*, 189-212. Cambridge: University Press.
Warr, P., Bird, M. & Rackham, N. (1978). *Evaluation of management training.* Farnborough: Gower Press.
Wehner, T. (1990). Über die Hand und das durch Technik Abhandengekommene. In: F. Frei & I. Udris (Hrsg.), *Das Bild der Arbeit*, 71-90. Bern: Huber.
Weidle, R. & Wagner, A. C. (1989). Die Methode des lauten Denkens. In: G. L. Huber & H. Mandl (Hrsg.), *Verbale Daten*. Weinheim: Beltz.
Weinmann, M. (1999). Hand und Hirn. In: M. Wehr & M. Weinmann (Hrsg.), *Die Hand – Werk-*

zeug des Geistes, 15-59. Heidelberg: Spektrum.

Weisberg, R. W. (1988). Problem Soving and creativity. In: R. J. Sternberg (Ed.), *The nature of creativity*. Cambridge: University Press.

Weißhahn, G, Pache, M., Hacker, W., Lindemann, U. & Römer, A. (2000). Unterstützungsmöglichkeiten des konstruktiven Entwicklungsprozesses. *Konstruktion*, *7/8*, 61-66.

Westhoff, K. & Kluck, M.-L. (1994). *Psychologische Gutachten schreiben und beurteilen.* Berlin: Springer.

Wijers, J. L. C. (1997). Rapid Prototyping übernimmt strategische Bedeutung. *Technische Rundschau*, *39/40*, 20-26.

Williges, B. H. & Williges, R. C. (1984). Dialogue design considerations for interactive computer systems. In: F. A. Muckler (Ed.), *Human Factor Review*, 167-209. Santa Monica: Human Factors Society.

Wingert, B. (1984). *CAD im Maschinenbau – Wirkungen, Chancen, Risiken*. Berlin: Springer.

Wygotski, L. S. (1964). *Denken und Sprechen.* Berlin: Akademie-Verlag.

Wirth, J. & Zanini, R. (1999). Realisierung eines gegenständlichen CAD mittels optischer Messtechnik und Roboterfräsen. In: P. Sachse & A. Specker, *Design thinking: Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten, Mensch-Technik-Organisation, Bd. 22*. Zürich: vdf.

Zuboff, S. (1988). *In the Age of the Smart Machine*. New York: Basic Book.

Fragebogen zum Einsatz von Arbeitsmitteln in den frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens

A1

1. Welche Arten von Unterstützungsformen verwendest Du vorrangig beim Klären der Anforderungen und beim Entwickeln von Lösungskonzepten?

Skizzen
O Freihandskizzen (Papier & Bleistift)
O maßhaltige Skizzen (auch Konstruktionszeichnungen)

Einfache, gegenständliche Modelle
O einfachste Modelle, bei denen die Materialien und Abmessungen nicht von Bedeutung sind
O einfache Modelle, bei denen die *Abmessungen* zumindest teilweise von Bedeutung sind (z. B. maßstäbliche Papiermodelle)
O einfache Modelle, bei denen die *Materialien* zumindest teilweise von Bedeutung sind (z. B. für einfache Materialversuche)

Komplexe, gegenständliche Modelle
O aufwendige Modelle, bei denen die Abmessungen und die Materialien von Bedeutung sind (z. B. maßstäbliche Modelle mit zumindest produktähnlichen Eigenschaften)

CAD
O 2D-CAD O 3D-CAD

2. Wie beginnst Du üblicherweise mit der Produktentwicklung?

O Ich kläre die Anforderungen möglichst vollständig zu Beginn, bevor ich mit dem Entwickeln von Lösungsideen beginne.
O Ich beginne früh, Lösungsideen zu entwickeln und leite dabei die Anforderungen an das Produkt ab.

3. Auf welche Weise klärst Du die Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt?

O durch Analyse von Dokumenten zu vorhandenen Produkten (Versuchsberichte etc.)
O durch Analyse von Fremdprodukten
O durch Skizzen, Modelle, Versuche
O durch Gespräche mit Kommilitonen/Dozenten

O .....

4. Wie hältst Du die Anforderungen fest?

O gedanklich
O schriftlich in Form einer Liste
O graphisch in Form von Diagrammen
O durch Skizzen
O durch Modelle
O .....

5. Welche Probleme sind bei Dir während der Klärung der Anforderungen schon häufiger aufgetreten?

O Informationen über bisherige Produkte (in Form von Zeichnungen, Modellen etc.) waren schwer zugänglich.
O Die Gesamtheit der Anforderungen war schwer zu überschauen/war zu umfangreich, um ständig geistig präsent zu sein.
O Die Hauptfunktion des Produkts war nicht eindeutig erkennbar.
O Die Wichtigkeit der einzelnen Anforderungen war nicht erkennbar.
O Die Anforderungen waren unrealistisch.
O Anforderungen, die nicht offensichtlich waren, wurden zu spät erkannt.

O .....

6. Wenn Du ein Lösungskonzept für ein Produkt entwickelst, arbeitest Du...

O überwiegend ohne Freihandskizzen anzufertigen.
O überwiegend mit Anfertigung von Freihandskizzen.

7. Wie gehst Du bei der Entwicklung von Lösungskonzepten im allgemeinen vor? (Bitte nur eine Antwort!)

O Ich erarbeite mehrere unterschiedliche Lösungsvarianten und wähle anschließend die Beste aus.
O Ich erarbeite zunächst eine Lösung und modifiziere diese anschließend, bis ich zu der besten Lösung gelange.
O Ich gehe folgendermaßen vor: .....

8. Das Entwickeln von Lösungskonzepten erfolgt in der Regel hauptsächlich ...

O durch mich allein.
O durch Arbeit innerhalb einer Gruppe.
O zu etwa gleichen Teilen durch Einzel- und Gruppentätigkeit.

9. Welche Sachverhalte erschweren Deiner eigenen Erfahrung nach das Entwickeln von Lösungskonzepten in besonderem Maße?

O Man „verrennt“ sich in eine Lösung, d. h., man klammert sich an eine Lösung, deren Untauglichkeit bereits abschätzbar wäre.
O Eine Lösung wird nicht ausreichend analysiert und auf ihre Tauglichkeit hin bewertet.
O Die Auswirkungen von einzelnen Änderungen auf das Gesamtprodukt können nur mit zusätzlichem Aufwand überprüft werden.
O Komplexe Zusammenhänge (Materialeigenschaften, Strömungsverhalten, thermische Bedingungen u. s. w.) werden nicht ausreichend überblickt.
O Bei der Arbeit mit 2D-Zeichnungen bzw. 2D-CAD werden 3D- Aspekte nicht wahrgenommen.
O Komplizierte räumliche Strukturen oder Bewegungsabläufe können vor dem geistigen Auge nur unter Schwierigkeiten als Ganzes betrachtet werden.
O .....

Gebrauch von Skizzen beim Klären der Anforderungen und beim Entwickeln von Lösungskonzepten

10. Zu welchem Zweck fertigst Du Skizzen an?

O um bestehende technische Objekte zu analysieren
O zur Klärung/Überprüfung von Anforderungen
O um Ideen für ein Lösungskonzept zu entwickeln
O zur Ausarbeitung neuer (Teil-)Lösungen
O um mir ein Konzept besser vorstellen zu können
O um ein Lösungskonzept zu überprüfen
O als kurzfristige Erinnerungshilfe
O zur längerfristigen Dokumentation
O zur Unterstützung der Kommunikation/Diskussion mit anderen Personen

O .....

11. Was stellst Du mit Hilfe von Skizzen dar?

O Gestalt/räumliche Anordnung
O Funktionseigenschaften
O Fertigungseigenschaften
O Montageeigenschaften

O .....

12. Kreuze bitte die Punkte an (max. 5), bei denen Du Dich bisher durch Skizzen am stärksten unterstützt fühltest.

O Auf nützliche Informationen aus früheren Skizzen konnte leicht zurückgegriffen werden.
O Beim Gebrauch von Skizzen sind bis dahin unbekannte Anforderungen klar geworden.
O Die Auswirkungen von einzelnen Festlegungen auf das Gesamtprodukt wurden besser erkannt.
O Das Vergleichen verschiedener Lösungen war leichter mit Hilfe von Skizzen.
O Skizzen regten zum Ausprobieren von Modifikationen an.
O Neue Lösungsideen konnten sofort bzw. ohne großen Aufwand fixiert werden.
O Beim Skizzieren wurden Fehler/Schwächen eines Lösungskonzepts erkannt.
O Beim Skizzieren entstanden neue Lösungsideen.
O Durch Skizzieren konnte das Produkt besser verstanden werden.
O Die Kommunikation mit Gesprächspartnern wurde verbessert.

O .....

13. Wie häufig setzt Du Freihandskizzen bei der Klärung der Anforderungen und dem Entwickeln von Lösungskonzepten ein?

O immer O häufig O hin und wieder O selten O nie

14. Wie häufig setzt Du Freihandskizzen beim anschließenden Konkretisieren von Lösungskonzepten ein?

O immer O häufig O hin und wieder O selten O nie

15. Denkst Du, dass Du mit Skizzieren <u>bessere Lösungskonzepte</u> entwickeln kannst als ohne Skizzieren?

O trifft völlig zu
O trifft überwiegend zu
O trifft teilweise zu
O trifft kaum zu
O trifft gar nicht zu

16. Denkst Du, dass Du mit Skizzieren <u>schneller</u> zu einem ausreichend guten Lösungskonzept gelangst als ohne Skizzieren?

O trifft völlig zu
O trifft überwiegend zu
O trifft teilweise zu
O trifft kaum zu
O trifft gar nicht zu

Gebrauch von <u>CAD</u> beim Klären der Anforderungen und beim Entwikkeln von Lösungskonzepten

(Mit dem Ausdruck „CAD“ ist im folgenden der Teil eines CAD-Systems gemeint, der zur Festlegung der Geometrie dient)

17. Welche CAD-Art nutzt Du vorrangig?

O 2D-CAD O 3D-CAD

18. Welches CAD-System nutzt Du dabei? .....

19. Wie lange arbeitest Du schon mit CAD? .....

20. Zu welchem Zweck setzt Du CAD ein?

O um bestehende technische Objekte zu analysieren
O zur Klärung/Überprüfung von Anforderungen
O um Ideen für ein Lösungskonzept zu entwickeln

O zur Ausarbeitung neuer (Teil-)Lösungen
O um Randbedingungen bzw. die Systemumgebung darzustellen
O um mir ein Konzept besser vorstellen zu können
O um ein Lösungskonzept zu überprüfen
O als kurzfristige Erinnerungshilfe
O zur längerfristigen Dokumentation
O zur Unterstützung der Kommunikation/Diskussion mit anderen Personen

O .....

21. Welche Effekte hast Du schon häufiger beim Umgang mit CAD wahrgenommen?

O Auf die Informationen in älteren Dateien wird häufig zurückgegriffen.
O Beim Ungang mit CAD werden bis dahin unbekannte Anforderungen klar.
O Die Auswirkungen von einzelnen Änderungen auf das Gesamtprodukt werden beim Umgang mit CAD erkannt.
O Bereits fixierte Lösungen können nur schwer variiert werden.
O Bereits fixierte Lösungen können leicht variiert werden.
O Neue Lösungsideen können sofort und ohne großen Aufwand fixiert werden.
O Beim Umgang mit CAD werden Fehler/Schwächen eines Lösungskonzepts erkannt.
O Beim Umgang mit CAD entstehen neue Lösungsideen.
O Durch den Umgang mit dem CAD-Modell wird das Produkt besser verstanden.
O Die Kommunikation mit Gesprächspartnern wird verbessert.

O .....

22. Wie häufig setzt Du CAD während einzelner Phasen der Konstruktion ein?

	immer	häufig	manchmal	selten	nie
Beim Klären der Anforderungen	O	O	O	O	O
Beim Entwickeln von Ideen zum Lösungskonzept	O	O	O	O	O
Bei der geometrischen Ausarbeitung des Konzepts	O	O	O	O	O
Bei der Ausarbeitung der fertigungsspezifischen Details	O	O	O	O	O

23. Wie hoch schätzt Du den lediglich für die Bedienung des 2D-CAD-Systems notwendigen Aufwand ein?

O sehr gering O gering O mittelmäßig O hoch O sehr hoch

24. Denkst Du, dass Du mit Hilfe von CAD bessere Lösungskonzepte entwickelst als ohne CAD?

O trifft völlig zu
O trifft überwiegend zu
O trifft teilweise zu

O trifft kaum zu
O trifft gar nicht zu

25. Denkst Du, dass Du mit Hilfe von CAD schneller zu einer ausreichend guten Lösung gelangst als ohne CAD?

O trifft völlig zu
O trifft überwiegend zu
O trifft teilweise zu
O trifft kaum zu
O trifft gar nicht zu

26. Wie hoch schätzt Du den Aufwand für Änderungen an CAD-Modellen ein?

O sehr gering O gering O mittelmäßig O hoch O sehr hoch

27. Wie hoch schätzt Du die intuitive Bedienbarkeit des CAD-Systems ein?

O sehr gering O gering O mittelmäßig O hoch O sehr hoch

28. Wie häufig kannst Du im CAD-System Festlegungen nicht Deinen Vorstellungen entsprechend umsetzen?

O sehr oft O oft O manchmal O selten O nie

29. Wie gut lassen sich die relevanten Eigenschaften eines Lösungskonzepts anhand der Darstellung durch das CAD-Modell erkennen?

	gut	mittel	schlecht	nicht relevant
Form/Geometrie	O	O	O	O
Größe/Dimension	O	O	O	O
Kinematische Eigenschaften	O	O	O	O
Verformungseigenschaften	O	O	O	O
Festigkeitseigenschaften	O	O	O	O
Strömungseigenschaften	O	O	O	O
Fertigungseigenschaften	O	O	O	O
Montageeigenschaften	O	O	O	O
Ergonomische Eigenschaften	O	O	O	O
Design/Ästhetik	O	O	O	O
.....	O	O	O	O

30. Stellst du mit Hilfe der vorhandenen Funktionalitäten des CAD-Systems auch Festlegungen dar, die nicht der Geometrie von Bauteilen entsprechen?

O ja O nein

31. Wenn ja, welche Art von Festlegungen stellst Du dar und auf welche Weise erreichst Du dies? (freie Antwort)

32. Sind Dir aus Deiner eigenen Erfahrung in der Arbeit mit CAD ergonomische Probleme bekannt? (freie Antwort)

Kombinierte Nutzung von CAD und Skizzen

33. Wie häufig fertigst Du eigens zur Vorbereitung der Arbeit mit CAD Skizzen an?

O immer O häufig O hin und wieder O selten O nie

34. Wie häufig fertigst Du während der Arbeit mit CAD Skizzen an?

O immer O häufig O hin und wieder O selten O nie

35. Wenn Du vor dem CAD-Einsatz mit Skizzen arbeitest, welche Festlegungen triffst Du dann im Allgemeinen anhand der Skizze?

O Anforderungen in Form von Text
O Randbedingungen als Zeichnung
O grundsätzliche Lösungsideen
O erste geometrische Festlegungen von (Teil-)Konzepten
O geometrische Detaillierung von (Teil-)Konzepten als 2-dimensionale Skizze
O geometrische Detaillierung von (Teil-)Konzepten als 3-dimensionale Skizze
O komplette Ausarbeitung des Konzepts als 2-dimensionale Skizze
O komplette Ausarbeitung des Konzepts als 3-dimensionale Skizze

O .....

36. Wie häufig skizzierst Du in einem aktuellen Ausdruck des CAD-Modells?

O immer O häufig O hin und wieder O selten O nie

37. Zu welchem Zweck setzt Du Skizzen parallel zu CAD ein?

O zur Klärung/Überprüfung von Anforderungen
O um Ideen für ein Lösungskonzept zu entwickeln
O zur Ausarbeitung neuer (Teil-)Lösungen
O um Änderungen an bestehenden (Teil-)Lösungen vorzunehmen
O um Randbedingungen bzw. die Systemumgebung darzustellen
O um mir ein Konzept besser vorstellen zu können
O um ein Lösungskonzept zu überprüfen
O als kurzfristige Erinnerungshilfe
O zur längerfristigen Dokumentation
O zur Unterstützung der Kommunikation/Diskussion mit anderen Personen

O .....

38. Was stellst Du anhand der Skizze, die Du parallel zu CAD einsetzt, im allgemeinen dar?

O Form/Geometrie
O Größe/Dimension
O Kinematische Eigenschaften
O Verformungseigenschaften
O Festigkeitseigenschaften
O Strömungseigenschaften
O Fertigungseigenschaften
O Montageeigenschaften
O Ergonomische Eigenschaften
O Design/Ästhetik

O .....

39. Würdest Du die automatische CAD-Verarbeitung von Formen, die auf einem Graphiktablett freihandskizziert wurden und nicht der Geometrie von Bauteilen entsprechen (müssen), als hilfreich empfinden?

O ja O nein

40. Welche Vorteile/Nachteile fallen Dir zum „digitalen Skizzieren“ und dessen automatischer Integration in CAD im Sinne einer geschlossen Informationskette ein?

Vorteile:

Nachteile:

Vielen Dank für Deine Mitarbeit!

Tab.: Prozentuale Verteilung der Probanden der Hauptuntersuchung auf die verschiedenen Studienrichtungen der Fakultät Maschinenwesen

Studiengang Maschinenbau	
Allgemeiner und konstruktiver Maschinenbau	17 %
Kraftfahrzeug- und Schienenfahrzeugtechnik	9 %
Leichtbau	11 %
Technisches Design	21 %
Angewandte Mechanik	3 %
Luft- und Raumfahrttechnik	8 %
Energietechnik	4 %
Produktionstechnik	13 %
Arbeitsgestaltung	-
Technische Gebäudeausrüstung	2 %
Textil- und Konfektionstechnik	2 %
Studiengang Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik	
Verfahrenstechnik	3 %
Verarbeitungstechnik	-
Holz- und Faserwerkstofftechnik	7 %

Allgemeiner Beobachtungsbogen („Gartengrill“) A3

Vp-Nr.: **Datum:** **Versuchsbedingung:**

Geschlecht: **Alter:**

Fachrichtung: **Semester:**

Vor Studium Lehre absolviert?:

Relevante Praktika absolviert?:

Vorerfahrungen im Konstruktionsbereich:

Selbsteinschätzung der Fähigkeiten im Konstruieren (1 = sehr gut – 5 = ungenügend):

Selbsteinschätzung der Fähigkeiten im Umgang mit AutoCAD:

Zeit		Bemerkungen
	Versuchsbeginn Biographische Daten	
	3D-Würfeltest (Gittler) Dauer:	
	FB zur Motivation FB zur psychischen Beanspruchung	
	(Einweisung in Graphiktablett) Bearbeitung der Problemstellung	
	FB zur psychischen Beanspruchung Schriftliche Nachbefragung	
	Präsentation der Lösung	
	Mündliche Nachbefragung Versuchsende	

Allgemeiner Beobachtungsbogen („Korkenzieher“) A4

Vp-Nr.: **Datum:** **Versuchsbedingung:**

Zeit		Bemerkungen
	Versuchsbeginn	
	FB zur Motivation FB zur psychischen Beanspruchung	
	(Einweisung in Graphiktablett) Bearbeitung der Problemstellung	
	FB zur psychischen Beanspruchung Schriftliche Nachbefragung	
	Präsentation der Lösung	
	Mündliche Nachbefragung Versuchsende	

Bitte kreuzen Sie bei den folgenden Aussagen die für Sie zutreffende Antwortkategorie an! A5

Es ist mir ziemlich gleichgültig, wie ich die Aufgabe erfülle.

[ ] trifft völlig zu
[ ] trifft überwiegend zu
[ ] trifft eher zu als nicht zu
[ ] Zutreffen und Nichtzutreffen halten sich die Waage
[ ] trifft eher nicht zu
[ ] trifft überwiegend nicht zu
[ ] trifft überhaupt nicht zu

Es interessiert mich, wie ich mit der Aufgabe zurechtkomme.

[ ] trifft völlig zu
[ ] trifft überwiegend zu
[ ] trifft eher zu als nicht zu
[ ] Zutreffen und Nichtzutreffen halten sich die Waage
[ ] trifft eher nicht zu
[ ] trifft überwiegend nicht zu
[ ] trifft überhaupt nicht zu

Ich werde versuchen, die Aufgabe so gut ich es kann, zu bearbeiten.

[ ] trifft völlig zu
[ ] trifft überwiegend zu
[ ] trifft eher zu als nicht zu
[ ] Zutreffen und Nichtzutreffen halten sich die Waage
[ ] trifft eher nicht zu
[ ] trifft überwiegend nicht zu
[ ] trifft überhaupt nicht zu

Wenn ich die Aufgabe nicht richtig bearbeiten würde, würde mich das überhaupt nicht stören.

[ ] trifft völlig zu
[ ] trifft überwiegend zu
[ ] trifft eher zu als nicht zu
[ ] Zutreffen und Nichtzutreffen halten sich die Waage
[ ] trifft eher nicht zu
[ ] trifft überwiegend nicht zu
[ ] trifft überhaupt nicht zu

Instruktion 1
„Gartengrill“

Im folgenden erhalten Sie einen Konstruktionsauftrag für einen Gartengrill.
Bearbeiten Sie diesen bitte bis zum *technischen Entwurf*.

Später wird Sie der Kunde aufsuchen, der Ihre ersten Arbeitsergebnisse besichtigen möchte. Legen Sie, wenn möglich, den Grill also *inhaltlich und zeichnerisch* soweit fest, dass Sie sicher sein können, dass das *Prinzip der Konstruktion* klar erkennbar ist und diese auch von einem Kollegen weiterbearbeitet werden kann.
Das von Ihnen gewählte Konzept sollte dazu im Hinblick auf alle im Konstruktionsauftrag genannten Anforderungen entsprechend konkretisiert werden.
Dies bedeutet auch, dass Sie entsprechend abschätzen, ob ihre Lösung funktioniert und *alle Anforderungen erfüllt* sind.

Das Skizzieren kann die Lösungsfindung erleichtern und verbessern. Sie sollen es deshalb bei dieser Aufgabe nutzen. Das bereitliegende Material steht Ihnen dazu zur Verfügung.
Falls Sie Fragen haben oder etwas benötigen, lassen Sie es mich bitte wissen.

Instruktion 2
„Gartengrill“

Im folgenden erhalten Sie einen Konstruktionsauftrag für einen Gartengrill.
Bearbeiten Sie diesen bitte bis zum *technischen Entwurf*.

Später wird Sie der Kunde aufsuchen, der Ihre ersten Arbeitsergebnisse besichtigen möchte. Legen Sie, wenn möglich, den Grill also *inhaltlich und zeichnerisch* soweit fest, dass Sie sicher sein können, dass das *Prinzip der Konstruktion* klar erkennbar wird und diese auch von einem Kollegen weiterbearbeitet werden kann.
Das von Ihnen gewählte Konzept sollte dazu im Hinblick auf alle im Konstruktionsauftrag genannten Anforderungen entsprechend konkretisiert werden.
Dies bedeutet auch, dass Sie entsprechend abschätzen, ob ihre Lösung funktioniert und alle *Anforderungen erfüllt* sind.

Das Skizzieren kann die Lösungsfindung erleichtern und verbessern. Sie sollen es deshalb bei dieser Aufgabe nutzen. Dazu steht Ihnen ein Graphiktablett zur Verfügung.
Bitte vergessen Sie nicht, ihre bisherige Skizze zu speichern, wenn Sie mit einer neuen Skizze beginnen.
Falls Sie Fragen haben oder etwas benötigen, lassen Sie es mich bitte wissen.

Instruktion 3
„Gartengrill“

Im folgenden erhalten Sie einen Konstruktionsauftrag für einen Gartengrill.
Bearbeiten Sie diesen bitte bis zum *technischen Entwurf*.

Später wird Sie der Kunde aufsuchen, der Ihre ersten Arbeitsergebnisse besichtigen möchte. Legen Sie, wenn möglich, den Grill also *inhaltlich und zeichnerisch* soweit fest, dass Sie sicher sein können, dass das *Prinzip der Konstruktion* klar erkennbar wird und diese auch von einem Kollegen weiterbearbeitet werden kann.
Das von Ihnen gewählte Konzept sollte dazu im Hinblick auf alle im Konstruktionsauftrag genannten Anforderungen entsprechend konkretisiert werden.
Dies bedeutet auch, dass Sie entsprechend abschätzen, ob ihre Lösung funktioniert und alle *Anforderungen erfüllt* sind.

Zur Lösungsfindung sollen Sie bei dieser Aufgabe ausschließlich AutoCAD nutzen.
Bitte teilen Sie mir während der Aufgabenbearbeitung immer kurz mit, wenn Sie eine Handskizze machen würden.

Konstruktionsauftrag „Gartengrill“

Sie gehören der Entwicklungsabteilung einer Firma an, die verschiedene Küchengeräte herstellt; vorrangig sind dies Backöfen und Mikrowellen sowie Raclette- und Fonduegeräte. Ebenfalls im Sortiment hat ihre Firma einige Gartengrills. Das Angebot der Grillgeräte soll nun um ein Modell erweitert werden, welches ihre Abteilung zu entwickeln hat.
Sie erhalten folgenden Auftrag:

Projekt „Gartengrill“

1. Es soll ein neuer Gartengrill im Handel angeboten werden, bei dem sich der Abstand zwischen Grillrost und Kohlepfanne *stufenlos* verstellen lässt.
Der Abstand soll hierbei *kontinuierlich* zwischen 5 cm und 25 cm variierbar sein und sich einstellen lassen, ohne dass Grillrost und Kohlepfanne direkt berührt werden müssen (auch nicht mit einer Zange oder mittels eines einhakbaren Griffes).

2. Für eine lange Benutzungsdauer ist es unabdingbar, dass sowohl Grillrost als auch Kohlepfanne gereinigt werden können, weshalb beide Teile leicht zu entnehmen sein müssen, um sie gesondert abspülen zu können.

3. Es versteht sich von selbst, dass alle Teile, die sich in der Nähe der Kohlepfanne befinden, hitzebeständig sein müssen.

4. Darüber hinaus ist die Wetterfestigkeit des gesamten Gerätes zu gewährleisten.
Der Grill muss transportabel sein, d. h., das Gewicht soll so gering wie möglich gehalten werden.

5. Aus Gründen der Wetterfestigkeit und der Mobilität darf das Gerät keine elektrischen Bestandteile aufweisen.

Konstruktionsauftrag „Korkenzieher“

Sie gehören der Entwicklungsabteilung einer Firma an, die verschiedene Haushalts- und Küchenkleingeräte, wie z. B. Mixer, Pürierstäbe, Dosenöffner und Korkenzieher herstellt. Das Angebot der Korkenzieher soll nun um ein Modell erweitert werden, welches ihre Abteilung zu entwickeln hat.
Sie erhalten folgenden Auftrag:

Projekt „Korkenzieher“

1. Es soll ein neuer Korkenzieher im Handel angeboten werden, der von Menschen mit einer Arm- oder Handbehinderung einfach bedienbar ist.
Die Weinflasche sollte sich mit diesem Modell *mit einer Hand* mit minimalem Kraftaufwand und ohne Verletzungsgefahr entkorken lassen.

2. Der Korkenzieher muss transportabel sein und darf nicht an einem Platz fest verschraubt sein. Gewicht und Größe sollen so gering wie möglich gehalten werden.

3. Er darf keine elektrischen Bestandteile aufweisen.

Beantworten Sie bitte noch folgende Fragen!

Wie schwierig erschien Ihnen die Aufgabe?

Sehr schwierig _____ Überhaupt nicht schwierig

Kommentar

Wie sicher sind Sie sich hinsichtlich der technischen Richtigkeit Ihrer Lösung?

Nicht sicher _____ Vollkommen sicher

Kommentar

Gab es Probleme bei der Lösung? Wenn ja, welche?

Mündliche Nachbefragung (Leitfaden)

1 Hat die Beobachtungssituation gestört?

2 Vorgehen

2.1 Kannst Du mir bitte Dein Vorgehen schildern?

Du hast die Aufgabenstellung bekommen und was hast Du dann gemacht?

2.2 Ist das die Vorgehensweise, die Du allgemein so hast?

2.3 Problem zunächst als Ganzheit bearbeitet oder zuerst Teilprobleme?

2.4 Alternative Ideen: Beim Hauptprinzip oder bei Teilprinzipien?

2.5 Wie erfolgte die Auswahl der umgesetzten Idee?

3 Grill/Korkenzieher bekannt?

3.1 Hast Du ein vergleichbares Modell im Kopf gehabt, das Du kennst?

3.2 Wie bist Du auf die Lösung gekommen?

3.3 Hast Du schon mal eine ähnliche Aufgabe bearbeitet?

(d. h. Lösungselemente schon im Gedächtnis (identisches Problem oder Analogie) oder erforderlich, sich neues auszudenken?)

3.4 Was wurde von dem bekannten Grill/Korkenzieher übernommen (Form oder Funktionsweise)?

4 Externe Unterstützung (Skizzierer)

4.1 Aufgabe auch ohne Skizzieren lösbar?

4.2 Hat Skizzieren/Skizze geholfen?
Wenn ja: Worin bestand der Nutzen?

4.3 Wenn freie Wahl: Eventuell CAD bei der Konstruktion genutzt?
Wenn ja: zu welchem Zeitpunkt?

4.4 (nur Graphiktablett-Nutzer): Konntest Du Unterschiede zum Skizzieren auf Papier feststellen?

4.5 Was sind Deiner Meinung nach Vor- bzw. Nachteile beim Einsatz eines derartigen Geräts in der Konstruktion?

5 Externe Unterstützung (CAD)

5.1 Wenn freie Wahl: Hättest Du überhaupt CAD beim Entwurf genutzt?
Wenn ja: zu welchem Zeitpunkt?

5.2 Hättest Du gerne zusätzlich zum CAD skizziert?
Wenn ja: zu welchem Zeitpunkt?

5.3 Würdest Du es als Vorteil empfinden, wenn das Skizzieren sofort digital erfolgen würde und die Skizze automatisch in ein CAD-Programm übertragen würde?
Siehst Du darin auch Nachteile?

„Gartengrill“ - Schema zur Bewertung der Lösungsgüte A13

	Forderung	3	2	1	0
1	**Stufenlose Verstellbarkeit**	Ja			Nein
2	**Arretierbarkeit der Höhen-verstellung**	Ja			Nein
3	**Keine Berührung von Rost und Kohlepfanne für die Ver-stellung erforderlich**	Ja (weder direkt noch indi-rekt)			Nein (direkt)
4	**Entnehmbarkeit von** **a) Rost** **b) Kohlepfanne**	 Ohne Aufwand Ohne Aufwand	 Geringer Aufwand Geringer Aufwand	 Großer Aufwand Großer Aufwand	 Nicht entnehmbar Nicht entnehmbar
5	**Wetterfestigkeit des Geräts**	Ja			Nein
6	**Hitzebeständigkeit aller Teile in Nähe der Kohlepfanne**	Ja			Nein
7	**Keine elektrischen Bestand-teile**	Ja			Nein
8	**Transportabilität** **a) Gewicht** **b) Montage**	 Leicht Kein Werkzeug Erforderlich	 Durchschnittlich Einfaches Werkzeug erforderlich	 Schwer Spezielles Werkzeug erforderlich	 Sehr schwer (nicht transportfähig) Keine (De-)Montage mög-lich

9	**Teile** **a) Anzahl** **b) Komplexität**	Bis 8 Einfache Teile	9 - 15 Mehr einfache als komplizierte Teile	16 - 21 Mehr komplizierte als einfache Teile	Über 21 Viele komplizierte Teile
10	**Unfallfreie Bedienbarkeit** **a) Kippen des Grills** **b) Verletzungsgefahr**	Kein Kippen möglich Keine Verletzungsgefahr	Kippen bei Fehlbedienung möglich Verletzung bei Fehlbedienung möglich	Kippen bei normaler Bedienung möglich Verletzung bei normaler Bedienung möglich	Kippen ständig provoziert Ständige Verletzungsgefahr
11	**Bedienbarkeit des Höhenverstellmechanismus**	Einfache Einhandbedienung ohne Kraftaufwand	Einfache Zweihandbedienung ohne Kraftaufwand *oder* Einhandbedienung mit Kraft	Komplizierte Zweihandbedienung *oder* Zweihandbedienung mit Kraft	Nicht allein bedienbar
12	**Erhaltung der Funktionsfähigkeit** **a) Wartungsaufwand** **b) Lebensdauer**	Keine Wartung nötig Kein Verschleiß denkbar	Gelegentliche Wartung ohne Demontage (einfach) Geringer Verschleiß bei normalem Betrieb	Gelegentliche Wartung, Demontage notwendig (kompliziert) Verschleiß bei normalem Betrieb	Ständige Pflege und Wartung nötig Starker Verschleiß bei normalem Betrieb

„Korkenzieher“ – Schema zur Bewertung der Lösungsgüte A14

	Forderung	3	2	1	0
1	**Einhandbedienung**	Einfache Einhandbedienung	Einfache Einhandbedienung und zusätzliche Fixierung durch weitere Körperteile erforderlich *oder* komplizierte Einhandbedienung	Komplizierte Einhandbedienung und zusätzliche Fixierung durch weitere Körperteile erforderlich	Nicht bedienbar mit nur einer Hand
2	**Bedienung ohne Kraftaufwand**	Ja			Nein
3	**Unfallfreie Bedienbarkeit** **a) Standsicherheit der Flasche**	Kein Kippen der Flasche möglich	Kippen bei Fehlbedienung möglich	Kippen bei normaler Bedienung möglich	Kippen der Flasche ständig provoziert
	b) Verletzungsfreie Bedienung	Keine Verletzungsgefahr	Verletzung bei Fehlbedienung möglich	Verletzung bei normaler Bedienung möglich	Ständige Verletzungsgefahr
4	**Transportabilität** **a) Zusatzvorrichtung (Flaschenhalterung)**	Nur Korkenzieher ohne Zusatzvorrichtung	Korkenzieher nur nutzbar unter Zuhilfenahme einer nicht zu verschraubenden Zusatzvorrichtung	Korkenzieher nur nutzbar nach temporärer Verschraubung einer Zusatzvorrichtung	Korkenzieher an einem Platz fest verschraubt (Fixstation)
	b) Gewicht	Leicht	Durchschnittlich	Schwer	Sehr Schwer (nicht transportfähig)
	c) Größe	Handlich und klein (Taschenformat)	Größe leicht reduzierbar (zusammenklappbar etc.)	Unhandlich, aber Größe reduzierbar	Unhandlich und Größe nicht reduzierbar

5	**Keine elektrischen Bestandteile**	Ja			Nein
6	**Teile** **a) Anzahl** **b) Komplexität**	bis 6 Einfache Teile	bis 9 Mehr einfache als komplizierte Teile	bis 12 Mehr komplizierte als einfache Teile	mehr als 12 Viele komplizierte Teile
7	**Erhaltung der Funktionsfähigkeit (Lebensdauer)**	Kein Verschleiß denkbar	Geringer Verschleiß bei normalem Gebrauch	Verschleiß bei normalem Betrieb	starker Verschleiß bei normalem Gebrauch

Schema zur Bewertung der Kommunizierbarkeit des technischen Informationsgehalts von Entwurfsergebnissen

	Kriterium	**1** **„eindeutig“**	**0** **„nicht eindeutig“, d. h. nicht bzw. zu gering vorhanden** (redundant/überbestimmt mehrdeutig/widersprüchl.)
1a	Räumliche Anordnung der Teile zueinander		
b	Teile an sich		
2	Kinematik/Mechanik		
3a	Notizen Ikons (Pfeile, Maße etc.)		
b	Schriftliche Notizen (Wortmarken, Text etc.)		
4	Gesamtdarstellung („erster Eindruck“)		

Kodierungsschema – Entwurfsschritte A16

Schrittart	Beschreibung	Formen	Beispiele mit Erläuterungen
1. Planung	Keine „produzierende“ Handlungssequenz *(Redefinition der Problemstellung, Ziel- bzw. Teilzielbildung)* = Pause im Bild = „Nachdenken“ im Protokoll	• Nach Redefinition der Problemstellung vor Beginn des ersten Schrittes • Im Prozess der Lösungserarbeitung	• Zeitspanne von der Redefinition bis zum ersten Generierungsschritt • Betrachten der Skizze im Prozess der Lösungserarbeitung und dann Schritt 2, 3 oder 4 • Entnehmen der Anforderungen aus der Problemstellung während des Konstruktionsprozesses
2. Bereitstellung	Basisschritt zur Bereitstellung verschiedener Funktionen etc. in Abhängigkeit vom Arbeitsmittel *(Handlungsvorbereitung)*		• Vorbereitende Bewegungen der Hand (z. B. gestisches Andeuten einer Linie) • Auswählen einer Funktion • Einstellen einer Funktion • Bereitstellen über Tastatur (≅ Aktivieren eines Symbols) • Erstellen von Hilfslinien beim CAD • Heranzoomen bei CAD, wenn danach 3 • Zurückzoomen • Hoch- und Herunterschieben des Entwurfs • Abspeichern des Entwurfs bzw. Nehmen eines neuen Blatts beim Skizzieren • Drehen des Papiers während der Bearbeitung • Wechsel zwischen Stift und Radiergummi
3. Generierung	Stringentes Lösungsverhalten im Sinne des Umsetzens eines auf ein Teilziel bezogenen Plans *(Handlungsausführung)*	• „Produktion“ der Lösung (Skizzieren/Zeichnen eines Elements der Konstruktion) • Hinzufügen neuer Funktionen bei bereits vorhandener Lösung	• Zeichnen und „Stehenlassen“ von Elementen (späteres Anpassen, Verwerfen etc. möglich) • Kopieren von Elementen (nur bei CAD) • Text, der inhaltlich über die zeichnerische Darstellung hinausgeht

4. Kontrolle	Ein „Zwischenprodukt“ wird durch Messen und/oder (mentales) Testen überprüft *(Handlungskontrolle)*	• „Mentale Kontrolle“ = Betrachten der Skizze und danach Schritte 5, 6 oder 7 • „Gegenständliche Kontrolle“ durch Nutzen der Möglichkeiten des Arbeitsmittels • Wiedereinfügen eines bereits vorhandenen Teils der Skizze/Zeichnung an anderer Stelle (nur bei CAD)	• Bemaßung (bei CAD Linien mit Maßzahlen und Pfeilen) • Testen der Funktion von Teilkonstruktionen (≅ Nachkontrollieren; Konzeption bleibt gleich, wird z. B. vergrößert/gezoomt ohne Schritt 3, aber mit 5, 6 oder 7) • bei Graphiktablett: wenn danach Abspeichern des Entwurfs (= Bereitstellung)
5. Verwerfung	Ein auf ein Teilziel bezogener Plan oder ein „gegenständliches“ Zwischenprodukt werden verworfen *(aus Resultatsrückmeldung)*	• Verwerfungsschritt *nach* Kontrolle (4) • Verwerfungsschritt *ohne* Kontrolle • Verwerfen eines Plans = Bereitstellung ohne folgende Aktion	• Radieren bzw. Löschen • Entfernen eines Teils der Skizze/Zeichnung • „Plan“ wird nicht ausgeführt (Stift auf Papier ohne Handlung nach „Pause“ bzw. Funktion wird angeklickt ohne nachfolgende Aktion)
6. Anpassung	Der Teil der Skizze/Zeichnung bleibt erhalten und wird nur hinsichtlich Länge, Breite etc. an die Konstruktion angepasst *(aus Resultatsrückmeldung)*	• Anpassungsschritt *nach* Kontrolle (4) • Anpassungsschritt *ohne* Kontrolle	• Verkürzen von CAD-Linien • Verstärken von Linien = Verdeutlichen des optischen Eindrucks • Entfernen von Hilfslinien bei CAD • Eingeben der Bemaßung über die Tastatur
7. Wiederholung	Ein bereits vorhandener bzw. vorhanden gewesener Lösungsansatz wird z. B. nach Verwerfung oder Kontrolle wieder aufgegriffen *(Resultatsrückmeldung und Wiederaufgreifen eines Ziels)*	• Erläutern eines bereits vorhandenen, in der Regel „skizzierten“ Lösungsansatzes bzw. Teilziels • Rückgriff auf einen bereits vorhandenen Lösungsansatz	• Beschriften von Teilfunktionen • Verdeutlichen der Funktion durch Pfeile, Symbole etc. • Rückgriff auf einen früheren Lösungsansatz (frühere Skizze oder Einfügen von schon einmal verworfenen Elementen)

Entwurfsproblem "Gartengrill" **Einfaktoriell** **ANOVA** **A17**

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung	Zwischen den Gruppen	1,407	2	,704	1,268	,288
	Innerhalb der Gruppen	34,962	63	,555		
	Gesamt	36,369	65			
Fähigkeit zur räuml. Vorstellung	Zwischen den Gruppen	5,182	2	2,591	1,971	,148
	Innerhalb der Gruppen	82,818	63	1,315		
	Gesamt	88,000	65			
Lösungsgüte (in Prozent)	Zwischen den Gruppen	22040,436	2	11020,218	12,162	,000
	Innerhalb der Gruppen	57085,587	63	906,120		
	Gesamt	79126,022	65			
Bearbeitungszeit (in Min.)	Zwischen den Gruppen	17838,909	2	8919,455	44,477	,000
	Innerhalb der Gruppen	12633,955	63	200,539		
	Gesamt	30472,864	65			
Kommunizierbarkeit Laie/Höhenverstellung	Zwischen den Gruppen	182,394	2	91,197	12,694	,000
	Innerhalb der Gruppen	452,591	63	7,184		
	Gesamt	634,985	65			
Kommunizierbarkeit Laie/Peripherie	Zwischen den Gruppen	144,273	2	72,136	11,428	,000
	Innerhalb der Gruppen	397,682	63	6,312		
	Gesamt	541,955	65			
Kommunizierbarkeit Experte/Höhenverstellung	Zwischen den Gruppen	175,848	2	87,924	12,799	,000
	Innerhalb der Gruppen	432,773	63	6,869		
	Gesamt	608,621	65			
Kommunizierbarkeit Experte/Peripherie	Zwischen den Gruppen	172,030	2	86,015	12,872	,000
	Innerhalb der Gruppen	421,000	63	6,683		
	Gesamt	593,030	65			
Erlebte Problemschwierigkeit	Zwischen den Gruppen	,175	2	8,742E-02	,036	,965
	Innerhalb der Gruppen	153,768	63	2,441		
	Gesamt	153,943	65			
Sicherheit hinsichtl. der Lösungsrichtigkeit	Zwischen den Gruppen	4,149	2	2,075	1,071	,349
	Innerhalb der Gruppen	122,029	63	1,937		
	Gesamt	126,178	65			
Beanspruchung Psychophys. Zustand (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	2,735	2	1,367	1,497	,232
	Innerhalb der Gruppen	57,535	63	,913		
	Gesamt	60,270	65			
Beanspruchung Konzentration (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	2,843	2	1,421	1,138	,327
	Innerhalb der Gruppen	78,659	63	1,249		
	Gesamt	81,502	65			
Beanspruchung Motivation (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	6,988	2	3,494	2,064	,135
	Innerhalb der Gruppen	106,630	63	1,693		
	Gesamt	113,618	65			
Beanspruchung Affektive Lage (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	5,258	2	2,629	2,769	,070
	Innerhalb der Gruppen	59,828	63	,950		
	Gesamt	65,086	65			
Prozentanteil Aufgabenstudium	Zwischen den Gruppen	100,950	2	50,475	3,104	,050
	Innerhalb der Gruppen	1024,425	63	16,261		
	Gesamt	1125,375	65			
Prozentanteil Skizzieren bzw. Zeichnen	Zwischen den Gruppen	3108,003	2	1554,001	16,345	,000
	Innerhalb der Gruppen	5989,660	63	95,074		
	Gesamt	9097,663	65			
Prozentanteil Notieren	Zwischen den Gruppen	919,872	2	459,936	9,632	,000
	Innerhalb der Gruppen	3008,370	63	47,752		
	Gesamt	3928,242	65			
Prozentanteil Betrachten	Zwischen den Gruppen	548,009	2	274,005	3,159	,049
	Innerhalb der Gruppen	5464,137	63	86,732		
	Gesamt	6012,146	65			
Prozentanteil Radieren bzw. Löschen	Zwischen den Gruppen	52,799	2	26,399	3,629	,032
	Innerhalb der Gruppen	458,304	63	7,275		
	Gesamt	511,102	65			
Prozentanteil Keine sichtbare Aktivität	Zwischen den Gruppen	2,351	2	1,175	,025	,976
	Innerhalb der Gruppen	2994,557	63	47,533		
	Gesamt	2996,907	65			
Wechsel Aufgabenstudium - externe Teiltätigkeit (pro Std.)	Zwischen den Gruppen	447,913	2	223,957	,847	,434
	Innerhalb der Gruppen	16662,105	63	264,478		
	Gesamt	17110,018	65			
Wechsel Aufgabenstudium - interne Teiltätigkeit (pro Std.)	Zwischen den Gruppen	127,261	2	63,630	4,898	,011
	Innerhalb der Gruppen	818,382	63	12,990		
	Gesamt	945,642	65			
Wechsel Externe - interne Teiltätigkeit (pro Std.)	Zwischen den Gruppen	56401,440	2	28200,720	4,378	,017
	Innerhalb der Gruppen	405780,4	63	6440,959		
	Gesamt	462181,9	65			

Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
2D-CAD	22	5,9659
Graphiktablett	22	6,1841
Papier und Bleistift	22	6,3205
Signifikanz		,141

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Fähigkeit zur räuml. Vorstellung

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
Graphiktablett	22	1,65
2D-CAD	22	2,05
Papier und Bleistift	22	2,32
Signifikanz		,066

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Lösungsgüte (in Prozent)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	31,3432	
Graphiktablett	22		61,7100
Papier und Bleistift	22		75,0073
Signifikanz		1,000	,148

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Bearbeitungszeit (in Min.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
Papier und Bleistift	22	50,77	
Graphiktablett	22	58,50	
2D-CAD	22		88,86
Signifikanz		,075	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Kommunizierbarkeit Laie/Höhenverstellung

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	1,05	
Graphiktablett	22		4,09
Papier und Bleistift	22		4,91
Signifikanz		1,000	,315

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Kommunizierbarkeit Laie/Peripherie

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	1,50	
Papier und Bleistift	22		4,64
Graphiktablett	22		4,64
Signifikanz		1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Kommunizierbarkeit Experte/Höhenverstellung

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	,77	
Graphiktablett	22		4,09
Papier und Bleistift	22		4,36
Signifikanz		1,000	,731

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Kommunizierbarkeit Experte/Peripherie

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	,86	
Papier und Bleistift	22		3,95
Graphiktablett	22		4,55
Signifikanz		1,000	,451

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Erlebte Problemschwierigkeit

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
2D-CAD	22	4,241
Graphiktablett	22	4,327
Papier und Bleistift	22	4,364
Signifikanz		,808

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Sicherheit hinsichtl. der Lösungsrichtigkeit

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
2D-CAD	22	4,459
Papier und Bleistift	22	4,986
Graphiktablett	22	4,995
Signifikanz		,234

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Psychophys. Zustand (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	,1409
2D-CAD	22	,5045
Graphiktablett	22	,6182
Signifikanz		,123

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Konzentration (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	5,773E-02
2D-CAD	22	,4682
Graphiktablett	22	,5227
Signifikanz		,198

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Motivation (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
Papier und Bleistift	22	,4273
Graphiktablett	22	,8682
2D-CAD	22	1,2227
Signifikanz		,059

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Affektive Lage (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
Papier und Bleistift	22	,3364
Graphiktablett	22	,6591
2D-CAD	22	1,0273
Signifikanz		,276

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Aufgabenstudium

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	6,392	
Papier und Bleistift	22	8,844	8,844
Graphiktablett	22		9,159
Signifikanz		,531	,796

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Skizzieren bzw. Zeichnen

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.		
		1	2	3
Graphiktablett	22	28,527		
Papier und Bleistift	22		36,164	
2D-CAD	22			45,314
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Notieren

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	1,805	
Papier und Bleistift	22		8,805
Graphiktablett	22		10,400
Signifikanz		1,000	,447

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Betrachten

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	35,918	
Papier und Bleistift	22	37,764	37,764
Graphiktablett	22		42,741
Signifikanz		,513	,081

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Radieren bzw. Löschen

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
Papier und Bleistift	22	2,524	
Graphiktablett	22	2,714	
2D-CAD	22		4,509
Signifikanz		,816	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Keine sichtbare Aktivität

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
Papier und Bleistift	22	5,922
2D-CAD	22	6,041
Graphiktablett	22	6,368
Signifikanz		,842

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Wechsel Aufgabenstudium - externe Teiltätigkeit (pro Std.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.
		1
2D-CAD	22	7,027
Papier und Bleistift	22	8,159
Graphiktablett	22	13,032
Signifikanz		,254

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Wechsel Aufgabenstudium - interne Teiltätigkeit (pro Std.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	3,420	
Graphiktablett	22	4,777	4,777
Papier und Bleistift	22		6,800
Signifikanz		,216	,067

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Wechsel Externe - interne Teiltätigkeit (pro Std.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
2D-CAD	22	95,859	
Graphiktablett	22		154,318
Papier und Bleistift	22		160,900
Signifikanz		1,000	,787

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Entwurfsproblem "Korkenzieher" Einfaktoriell ANOVA A18

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung	Zwischen den Gruppen	1,549	2	,775	1,536	,223
	Innerhalb der Gruppen	31,773	63	,504		
	Gesamt	33,322	65			
Fähigkeit zur räuml. Vorstellung	Zwischen den Gruppen	2,455	2	1,227	,904	,410
	Innerhalb der Gruppen	85,545	63	1,358		
	Gesamt	88,000	65			
Lösungsgüte (in Prozent)	Zwischen den Gruppen	13359,017	2	6679,509	12,849	,000
	Innerhalb der Gruppen	32749,656	63	519,836		
	Gesamt	46108,673	65			
Bearbeitungszeit (in Min.)	Zwischen den Gruppen	8583,177	2	4291,588	19,729	,000
	Innerhalb der Gruppen	13051,712	63	217,529		
	Gesamt	21634,889	65			
Kommunizierbarkeit Laie	Zwischen den Gruppen	184,121	2	92,061	14,688	,000
	Innerhalb der Gruppen	394,864	63	6,268		
	Gesamt	578,985	65			
Kommunizierbarkeit Experte	Zwischen den Gruppen	129,121	2	64,561	13,678	,000
	Innerhalb der Gruppen	297,364	63	4,720		
	Gesamt	426,485	65			
Erlebte Problemschwierigkeit	Zwischen den Gruppen	9,003	2	4,501	1,462	,240
	Innerhalb der Gruppen	193,997	63	3,079		
	Gesamt	203,000	65			
Sicherheit hinsichtl. der Lösungsrichtigkeit	Zwischen den Gruppen	20,151	2	10,076	3,988	,023
	Innerhalb der Gruppen	159,159	63	2,526		
	Gesamt	179,310	65			
Beanspruchung Psychophys. Zustand (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	1,313	2	,657	,455	,637
	Innerhalb der Gruppen	90,957	63	1,444		
	Gesamt	92,270	65			
Beanspruchung Konzentration (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	1,634	2	,817	,560	,574
	Innerhalb der Gruppen	91,986	63	1,460		
	Gesamt	93,620	65			
Beanspruchung Motivation (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	1,538	2	,769	,806	,451
	Innerhalb der Gruppen	60,121	63	,954		
	Gesamt	61,659	65			
Beanspruchung Affektive Lage (Differenz Prä-/Posttestwert)	Zwischen den Gruppen	,328	2	,164	,131	,877
	Innerhalb der Gruppen	78,767	63	1,250		
	Gesamt	79,095	65			
Prozentanteil Aufgabenstudium	Zwischen den Gruppen	14,201	2	7,100	1,181	,314
	Innerhalb der Gruppen	360,750	63	6,012		
	Gesamt	374,951	65			
Prozentanteil Skizzieren bzw. Zeichnen	Zwischen den Gruppen	3631,554	2	1815,777	25,468	,000
	Innerhalb der Gruppen	4277,790	63	71,296		
	Gesamt	7909,344	65			
Prozentanteil Notieren	Zwischen den Gruppen	1011,133	2	505,566	14,855	,000
	Innerhalb der Gruppen	2041,984	63	34,033		
	Gesamt	3053,117	65			
Prozentanteil Betrachten	Zwischen den Gruppen	235,336	2	117,668	1,326	,273
	Innerhalb der Gruppen	5323,644	63	88,727		
	Gesamt	5558,980	65			
Prozentanteil Radieren bzw. Löschen	Zwischen den Gruppen	52,337	2	26,168	5,160	,009
	Innerhalb der Gruppen	304,293	63	5,072		
	Gesamt	356,630	65			
Prozentanteil Keine sichtbare Aktivität	Zwischen den Gruppen	314,408	2	157,204	3,953	,024
	Innerhalb der Gruppen	2386,091	63	39,768		
	Gesamt	2700,499	65			
Wechsel Aufgabenstudium - externe Teiltätigkeit (pro Std.)	Zwischen den Gruppen	129,432	2	64,716	,562	,573
	Innerhalb der Gruppen	6911,254	63	115,188		
	Gesamt	7040,686	65			
Wechsel Aufgabenstudium - interne Teiltätigkeit (pro Std.)	Zwischen den Gruppen	17,545	2	8,773	3,486	,037
	Innerhalb der Gruppen	151,003	63	2,517		
	Gesamt	168,548	65			
Wechsel Externe - interne Teiltätigkeit (pro Std.)	Zwischen den Gruppen	131897,0	2	65948,512	8,174	,001
	Innerhalb der Gruppen	484106,2	63	8068,437		
	Gesamt	616003,2	65			

Motivation zur Bearbeitung der Problemstellung

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Graphiktablett	22	5,8591
2D-CAD	22	6,0591
Papier und Bleistift	22	6,2341
Signifikanz		,102

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Fähigkeit zur räuml. Vorstellung

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	1,86
2D-CAD	22	1,96
Graphiktablett	22	2,27
Signifikanz		,278

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Lösungsgüte (in Prozent)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2	3
2D-CAD	22	41,6955		
Graphiktablett	22		61,8577	
Papier und Bleistift	22			76,3927
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Bearbeitungszeit (in Min.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.	
		1	2
Graphiktablett	22	56,86	
Papier und Bleistift	22	58,86	
2D-CAD	22		80,64
Signifikanz		,663	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Kommunizierbarkeit Laie

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.		
		1	2	3
2D-CAD	22	1,95		
Graphiktablett	22		3,95	
Papier und Bleistift	22			6,05
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Kommunizierbarkeit Experte

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05.		
		1	2	3
2D-CAD	22	2,55		
Graphiktablett	22		3,95	
Papier und Bleistift	22			5,95
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Erlebte Problemschwierigkeit

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
2D-CAD	22	2,705
Graphiktablett	22	3,305
Papier und Bleistift	22	3,591
Signifikanz		,118

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Sicherheit hinsichtl. der Lösungsrichtigkeit

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
2D-CAD	22	4,118	
Graphiktablett	22	4,877	4,877
Papier und Bleistift	22		5,468
Signifikanz		,118	,222

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Psychophys. Zustand (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
2D-CAD	22	,1682
Papier und Bleistift	22	,4364
Graphiktablett	22	,4909
Signifikanz		,407

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Konzentration (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	,3705
Graphiktablett	22	,6182
2D-CAD	22	,7500
Signifikanz		,332

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Motivation (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	,5000
2D-CAD	22	,7409
Graphiktablett	22	,8682
Signifikanz		,244

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Beanspruchung Affektive Lage (Differenz Prä-/Posttestwert)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	,2773
Graphiktablett	22	,3591
2D-CAD	22	,4500
Signifikanz		,633

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Aufgabenstudium

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Papier und Bleistift	22	4,295
2D-CAD	22	4,755
Graphiktablett	22	5,436
Signifikanz		,160

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Skizzieren bzw. Zeichnen

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
Graphiktablett	22	29,700	
Papier und Bleistift	22	33,881	
2D-CAD	22		47,625
Signifikanz		,114	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Notieren

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
2D-CAD	22	,465	
Papier und Bleistift	22		8,810
Graphiktablett	22		9,300
Signifikanz		1,000	,786

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Betrachten

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
2D-CAD	22	39,940
Papier und Bleistift	22	43,629
Graphiktablett	22	44,418
Signifikanz		,152

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Radieren bzw. Löschen

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
Papier und Bleistift	22	2,105	
Graphiktablett	22	3,191	3,191
2D-CAD	22		4,365
Signifikanz		,124	,097

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Prozentanteil Keine sichtbare Aktivität

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
2D-CAD	22	2,845	
Papier und Bleistift	22		7,276
Graphiktablett	22		7,927
Signifikanz		1,000	,739

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Wechsel Aufgabenstudium - externe Teiltätigkeit (pro Std.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1
Graphiktablett	22	5,498
Papier und Bleistift	22	5,781
2D-CAD	22	8,705
Signifikanz		,368

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Wechsel Aufgabenstudium - interne Teiltätigkeit (pro Std.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
2D-CAD	22	1,473	
Graphiktablett	22	2,120	2,120
Papier und Bleistift	22		2,781
Signifikanz		,191	,183

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Wechsel Externe - interne Teiltätigkeit (pro Std.)

Duncan [a]

Experimentelle Bedingung	N	Untergruppe für Alpha = .05. 1	2
2D-CAD	22	111,885	
Graphiktablett	22	155,777	
Papier und Bleistift	22		224,205
Signifikanz		,119	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a. Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 22,000.

Erklärung

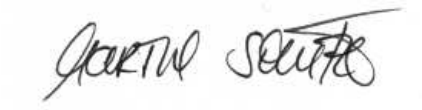
Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Allgemeine Psychologie, Biopsychologie und Methoden der Psychologie der Technischen Universität Dresden unter der wissenschaftlichen Betreuung von Prof. Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker angefertigt.

Es haben keine früheren erfolglosen Promotionsverfahren stattgefunden.

Die Promotionsordnung der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften vom 20. März 2000 erkenne ich an.

Dresden, 20.01.2003



Martina Schütze